

**VŠB – Technická univerzita Ostrava**  
**Fakulta elektrotechniky a informatiky**

# **BAKALÁŘSKÁ PRÁCE**

**2019**

**Daniel Sliwka**

**VŠB – Technická univerzita Ostrava**  
**Fakulta elektrotechniky a informatiky**  
**Katedra elektroenergetiky**

**Měření na vysokonapět'ových metaloxidových  
svodičích přepětí**  
**Measurements on ZnO medium voltage surge  
arresters**

**2019**

**Daniel Sliwka**

VŠB - Technická univerzita Ostrava  
Fakulta elektrotechniky a informatiky  
Katedra elektroenergetiky

## Zadání bakalářské práce

Student: **Daniel Sliwka**  
Studijní program: B2649 Elektrotechnika  
Studijní obor: 3907R001 Elektroenergetika  
Téma: **Měření na vysokonapětových metaloxidových svodičích přepětí**  
**Measurements on ZnO medium voltage surge arresters**  
Jazyk vypracování: čeština

Zásady pro vypracování:

Teorie metaloxidových svodičů přepětí  
Měření zbytkového napětí  
Měření proudu bleskojistkou

Seznam doporučené odborné literatury:

ČSN EN 60071-1 ed. 2 Koordinace izolace: Část 1: Definice, principy a pravidla, 2nd ed, Praha: Český normalizační institut, 2006.

ČSN EN 60071-2 Elektrotechnické předpisy - Koordinace izolace: Část 2: Pravidla pro použití, 1st ed, Praha: Český normalizační institut, 2000.


Formální náležitosti a rozsah bakalářské práce stanoví pokyny pro vypracování zveřejněné na webových stránkách fakulty.


Vedoucí bakalářské práce: **Ing. Tadeusz Sikora, Ph.D.**

Datum zadání: 01.09.2018

Datum odevzdání: 30.04.2019



  
prof. Ing. Stanislav Rusek, CSc.  
vedoucí katedry

  
prof. Ing. Pavel Brandštetter, CSc.  
děkan fakulty

## **Prohlášení**

Prohlašuji, že jsem tuto bakalářskou/diplomovou práci vypracoval samostatně. Uvedl jsem všechny literární prameny a publikace, ze kterých jsem čerpal.

## **Poděkování**

Děkuji vedoucímu mé bakalářské práce panu Ing. Tadeuszi Sikorovi Ph.D. za odborné a účelné konzultace během zpracovávání mé bakalářské práce.

**V Ostravě 30.4. 2019**

**Podpis:**

## **Abstrakt**

Tato bakalářské práce se dá obrazně rozdělit na čtyři hlavní části. V první části práce je rozebráno samotné přepětí. Dozvídáme se zde, co je to přepětí, jak vzniká, způsoby omezení a vliv, ať už na izolaci nebo parametry sítě. V druhé části se dozvídáme o všech typech bleskojistik. Je zde popsán mechanismus bleskojistky se ZnO bloky od firmy ABB, typy bleskojistik, které tato firma vyrábí a jejich testování. Třetí část je v podstatě praktická. Naše škola dostala od firmy ABB jedny z nejnovějších vyvinutých bleskojistik bez jiskřišť, skládající se z metaloxidových rezistorů, potažené silikonovým krytem. Na těchto bleskojistkách s různým jmenovitým napětím byly provedeny dva testy. Měření zbytkového napětí bylo provedeno pomocí impulsního generátoru, kterým také disponuje naše škola. Ve čtvrté části je zpracováno měření týkající se svodového proudu svodiče. Tento test znázorňuje závislost svodového proudu na přiloženém napětí.

## **Klíčová slova**

Přepětí, svodič přepětí, varistor, metaloxid, generátor impulzů, zbytkové napětí, svodový proud

## **Abstract**

This bachelor thesis can be split into the four main parts. In the first part of the bachelor thesis I analyze the overvoltage. We will get to know what overvoltage is, how it forms, ways of limitation and influence of it on isolation or electrical grid parameters. In the second part of the bachelor thesis we will learn about all types of surge arresters. There is description of surge arresters with ZnO resistors, types of surge arresters and tests of it. The third part of the bachelor thesis is basically practical. Our school received one of the newest surge arresters from the company called ABB without spark gaps, consisting of metaloxid resistors and covered with silicone shield. We performed two tests on this surge arresters with different nominal voltages. Measurement of residual voltage was done by impulse generator which was also provided by our school. In the fourth part measurement of the continuous current is done. This test shows dependency of continuous current on applied voltage.

## **Key words**

Overvoltage, surge arresters, varistor, metal oxid, impulse generator, residual voltage, leakage current

# Obsah

Seznam použitých symbolů a zkratk .....	8
Seznam ilustrací a seznam tabulek .....	10
Úvod .....	11
1. Přepětí .....	12
1.1 Druhy přepětí .....	12
1.1.1 Atmosférická přepětí .....	12
1.1.2 Spínací přepětí .....	13
1.1.3 Dočasná přepětí .....	14
1.1.4 Přejídná přepětí .....	14
1.2 Způsoby omezení přepětí .....	14
2. Svodiče přepětí .....	15
2.1 Druhy bleskojistek .....	15
2.1.1 Růžkové jiskřiště .....	15
2.1.2 Torokova trubice .....	15
2.1.3 Výbojové bleskojistky .....	16
2.1.4 Ventilové bleskojistky .....	16
2.1.5 Metaloxidový svodič přepětí .....	16
2.2 Popis MO svodiče .....	16
2.2.1 Metaloxidový rezistor (Varistor) .....	17
2.2.2 Typy konstrukcí MO svodičů .....	19
2.2.2 Parametry MO svodiče .....	21
2.3 Testování svodičů .....	22
2.3.1 Rutinní testy .....	22
2.3.2 Speciální testy .....	23
3. Měření zbytkového napětí bleskojistky .....	24
3.1 Impulzní Generátor SSG-ZUS .....	24
3.2 Atmosférický proudový impulz .....	26
3.3 Schéma a obrázky zapojení, použité přístroje .....	27
3.4 Popis a postup měření zbytkového napětí .....	29
3.5 Naměřené a vypočtené hodnoty .....	30
3.6 Grafy z naměřených dat .....	31
4. Měření proudu svodiče přepětí .....	33
4.1 Schéma zapojení a měřicí přístroje .....	33
4.2 Popis a postup měření proudu .....	33
4.3 Naměřené hodnoty a vypočtené hodnoty .....	35

4.4 Grafické závislosti naměřených hodnot .....	36
Závěr: .....	39
Literatura .....	40



## Seznam použitých symbolů a zkratek

$A$		Ampér, jednotka elektrického proudu
$ABB$		Asea Brown Boveri
$b$	(m)	Vzdálenost místa úderu blesku od stožáru
$C$	(F)	Kapacita
$C$		Coulomb, jednotka elektrického náboje
$f$	(Hz)	Frekvence
$DUT$		Device under test- testované zařízení
$F$		Farad, jednotka kapacity
$GIS$		Plynem plněný svodič přepětí
$g$		Gram, jednotka hmotnosti
$h$	(m)	Výška stožáru
$Hz$		Hertz, jednotka frekvence
$I$	(A)	Elektrický proud
$I_C$	(A)	Svodový proud
$I_m$	(A)	Maximální hodnota proudu blesku
$I_{max}$	(A)	Maximální vrcholová hodnota proudu
$IEC$		International Electrotechnical Commission
$J$		Joule, jednotka energie
$k$		Činitel přepětí
$km/h$		Kilometr za hodinu, jednotka rychlosti
$L$	(H)	Indukčnost
$LSA$		Line surge arrester
$m$		Metr, jednotka délky
$MO$		Metal oxid, typicky ZnO
$NGLA$		Non gapped line arresters – Bezjiskřišťové svodiče přepětí
$R$	( $\Omega$ )	Elektrický odpor
$SF_6$		Plyn Fluorid sírový
$SG$		Spark gap

$SiC$		Karbid křemíku
$s$		Sekunda, jednotka času
$T_1$	(s)	Doba čela proudového impulzu
$T_2$	(s)	Doba půltýlu proudového impulzu
$U$		Elektrické napětí
$U_C$	(V)	Trvalé provozní napětí svodiče přepětí
$U_M$	(V)	Maximální naměřená hodnota napětí mezi vodičem a zemí
$U_{M_{dov}}$	(V)	Nejvyšší maximální dovolená hodnota napětí mezi vodičem a zemí
$U_m$	(V)	Velikost napětí v místě úderu blesku
$U_n$	(V)	Prahové napětí varistoru
$U_0$	(V)	Napětí zdroje
$U_{pl}$	(V)	Ochranná hladina svodiče
$U_r$	(V)	Jmenovité napětí svodiče přepětí
$U_{res}$	(V)	Zbytkové napětí svodiče
$USA$		United States of America
$V$		Volt, jednotka elektrického napětí
$vn$		Vysoké napětí
$Z_V$		Vlnová impedance vedení, jednotka ohm na kilometr
$ZnO$		Oxid zinečnatý
$\alpha$	(°)	Ochranný úhel zemnicího lana
$^{\circ}C$		Stupeň Celsia, jednotka teploty
$\Omega$		Ohm, jednotka elektrického odporu

## Seznam ilustrací a seznam tabulek

Obrázek 1: Průběhy zotaveného napětí při vypínání obvodu.....	13
Obrázek 2: Růžkové jiskřiště .....	15
Obrázek 3: Torokova trubice.....	15
Obrázek 4: Technologický postup výroby varistorových bloků .....	17
Obrázek 5: Varistorové bloky od firmy ABB .....	18
Obrázek 6: Obecná voltampérová charakteristika varistoru .....	18
Obrázek 7: Porcelánový svodič přepětí.....	19
Obrázek 8: Svodiče přepětí v silikonovém plášti.....	20
Obrázek 9: Plynem plněný svodič přepětí od firmy ABB.....	20
Obrázek 10: Deadfront svodič přepětí.....	21
Obrázek 11: Impulzní generátor SSG-ZUS.....	24
Obrázek 12: Náhradní schéma zapojení impulzního generátoru s testovaným zařízením .....	26
Obrázek 13: Normalizovaný atmosférický proudový impuls 8/20 $\mu$ s .....	26
Obrázek 14: Blokové schéma zapojení pro měření zbytkového napětí .....	27
Obrázek 15: Testované svodiče přepětí.....	27
Obrázek 16: SSG-ZUS v zapojení 2s3p.....	28
Obrázek 17: Externí část impulzního generátoru pro zapojení 2s3p.....	28
Obrázek 18: SSG-ZUS v zapojení 3s2p [7] .....	29
Obrázek 19: Pracoviště pro měření zbytkového napětí.....	30
Obrázek 20: Průběh zbytkového napětí na MWD 16.....	31
Obrázek 21: Průběh zbytkového napětí na MWK 22.....	31
Obrázek 22: Průběh zbytkového napětí na MWD 27.....	32
Obrázek 23: Průběhy pěti impulsů na MWK 27.....	32
Obrázek 24: Schéma zapojení pro měření svodového proudu .....	33
Obrázek 25: Vybavení kobky.....	34
Obrázek 26: Ovládací pult s osciloskopem .....	34
Obrázek 27: Průběh napětí a proudu při $U_c = 16$ kV (foto z osc.).....	36
Obrázek 28: Svodový proud bleskojistky .....	36
Obrázek 29: Průběh napětí a proudu při $U_c = 9,85$ kV .....	37
Obrázek 30: Průběh napětí a proudu při $U_c = 19,9$ kV .....	37
Obrázek 31: Lissajousova křivka pro $U_c = 9,58$ kV .....	37
Obrázek 32: Lissajousova křivka pro $U_c = 19,2$ kV .....	38
Tabulka 1: První varianta zapojení impulzního generátoru proudu .....	25
Tabulka 2: Druhá varianta zapojení impulzního generátoru proudu.....	25
Tabulka 3: Třetí varianta zapojení impulzního generátoru proudu .....	25
Tabulka 4: Čtvrtá varianta zapojení impulzního generátoru .....	25
Tabulka 5: Naměřené hodnoty u měření zbytkového napětí.....	30
Tabulka 6: Tabulka pěti impulsů na svodiči MWK27 .....	30
Tabulka 7: Naměřené a vypočtené hodnoty pro měření proudu bleskojistky .....	35

# Úvod

Bakalářská práce se věnuje přepětí v elektrických sítích a přístrojům k jeho omezení zvané bleskojistky. Přepětí je přechodový děj, který se v síti objevuje při úderu blesku, spínacích dějích, kývání synchronních strojů a poruchách vedení. Tomuto tématu je obsáhleji věnována první část této práce. Svodiče přepětí zapojujeme paralelně k chráněnému objektu do sítí, abychom chránili distribuční síť a její zařízení před účinky tohoto nežádoucího přechodového děje. Pokud se podíváme na typy omezovačů z pohledu historie, tak existuje několik typů od nezákladnějšího jiskřiště až po metaloxidové svodiče přepětí, což souvisí s pokrokem v technologii a materiálovém inženýrství. Všechny známé typy bleskojistek jsou popsány v druhé části. Nejpodrobnější popis a princip působení je zpracován u metaloxidových svodičích přepětí. Tyto svodiče se skládají do sloupce zapojených varistorových válců, který je pokryt polymerovým pláštěm. Varistor je polovodičová součástka závislá na napětí. Při překročení prahového napětí klesne odpor a varistory začne téct proud. Po průchodu výbojového proudu se objeví na svodiči zbytkové napětí. Toto napětí bylo mým úkolem změřit v poslední části práce. Využití zde najde generátor proudového impulsu SSG-ZUS, který umí vytvořit normalizovaný atmosférický impuls proudu simulující úder blesku. Druhé měření se týkalo svodového proudu, který svodičem teče při přiloženém napětí.

# 1. Přepětí

Přepětí je jev, kdy hodnota napětí je větší, než je maximální hodnota provozního napětí v elektrické síti. Jeho velikost je určena činitelem  $k$ . O přepětí můžeme hovořit tehdy, když činitel  $k > 1$  [1]. Tuto úvahu můžeme vyčíst z následujícího vztahu:

$$k = \frac{U_M}{U_{M_{dov}}} \quad (1)$$

$U_M$  – Maximální naměřená hodnota napětí mezi vodičem a zemí.

$U_{M_{dov}}$  – Nejvyšší maximální dovolená hodnota napětí mezi vodičem a zemí

Jak známo, v praxi dochází ke kolísání napětí v síti. Podle normy ČSN EN 50 160 je v sítích vysokého napětí dovolená tolerance kolísání napětí deset procent. Pokud amplituda nepřekročí zmiňovaných deset procent jmenovité hodnoty, mluvíme o nadpětí. Za přepětí považujeme tedy hodnotu  $k > 1,1$ .

Přepětí se často objevuje na venkovním vedení při atmosférickém výboji. Ať už blesk udeří poblíž vedení, do stožáru, zemního lana nebo přímo do fázového lana, což je nejhorší případ. V elektrických soustavách je mnoho zdrojů přepětí. Můžeme jmenovat např. spínání v elektrických obvodech, úder blesku, kývání synchronních strojů, ferorezonance nebo poruchy zemních spojení. Přepětí způsobuje poškození izolace, elektrických zařízení, spotřebičů, přístrojů, chybné stavy čidel, ztráty uložených dat a v krajních případech požáry [4]. Z těchto důvodů je přepětí v síti nežádoucí stav, který se snažíme eliminovat. Izolaci, která by vydržela všechny možné hodnoty napětí, není možné z ekonomického hlediska navrhnout. Proto se do sítě zapojují bleskojistky, které hlídají hodnotu napětí, protože bezpečná a ekonomicky únosná elektrická síť vyžaduje důslednou ochranu připojených elektrických zařízení do sítě proti přepětí. To platí obecně pro vysokonapěťové, střední i nízkonapěťové systémy. Můžeme tedy konstatovat, že důsledky působení přepětí jsou pro nás velice nepříjemné. [3]

## 1.1 Druhy přepětí

Z pohledu vzniku se přepětí v zásadě dělí na tři typy. Atmosférická, spínací a dočasná přepětí. Doba trvání atmosférických přepětí jsou řádově mikrosekundy. Doba spínacích přepětí se pohybuje v řádech milisekund. Dočasná přepětí mají nejdelší doby trvání. V praxi to mohou být sekundy i minuty. [1]

### 1.1.1 Atmosférická přepětí

K atmosférickým přepětím dochází především při bouřce v letních měsících vlivem úderů atmosférických výbojů. Již dříve bylo zmíněno, že toto přepětí trvá řádově mikrosekundy, a proto se mu taky říká bleskové. Jejich velikost může dosáhnout hodnot přesahujících  $k > 10$  ve středních napěťových systémech. Atmosférická neboli blesková přepětí ohrožují spotřebiče, jak při přímém úderu do budovy, trafostanice atd., tak i při nepřímém úderu, kdy se impulz šíří po elektrickém vedení.

U atmosférických přepětí se ještě dají rozlišit 3 případy úderů blesku v závislosti na místě úderu, a to úder do vedení, do stožáru a zemního lana a zcela mimo vedení. Úder blesku v přírodě nelze předpovídat. Obecně lze říct, že blesk nejčastěji zasáhne vysoké stavby, stromy, stožáry. Ovšem nebezpečí nám při bouřce hrozí také v autě. Známé jsou i případy, kdy blesk zasáhl člověka na sídlišti mezi vysokými panelovými domy s hromosvody.

Při úderu blesku do vedení se proud rozdělí do obou směrů [1]. Velikost napětí v místě úderu můžeme dopočítat podle vztahu [1]:

$$U_m = I_m * \frac{Z_v}{2} \quad (kV) \quad (2)$$

$Z_v$  – vlnová impedance vedení ( $\Omega * km^{-1}$ )

$I_m$  – maximální hodnota proudu blesku ( $kA$ )

Pokud blesk udeří mimo vedení do země, bude se na vedení indukovat napětí vlivem naindukovaného náboje atmosférickým výbojem. Hodnota indukovaného napětí závisí také na vzdálenosti blesku od stožáru, výšce stožáru a maximální hodnotě proudu příslušného blesku. Pro tento případ zjistíme hodnotu indukovaného napětí ve vedení podle vztahu [1]:

$$U_i = 30 * \frac{h}{b} * I_m \quad (kV) \quad (3)$$

$I_m$  – maximální hodnota proud blesku ( $kA$ )

$h$  – výška stožáru ( $m$ )

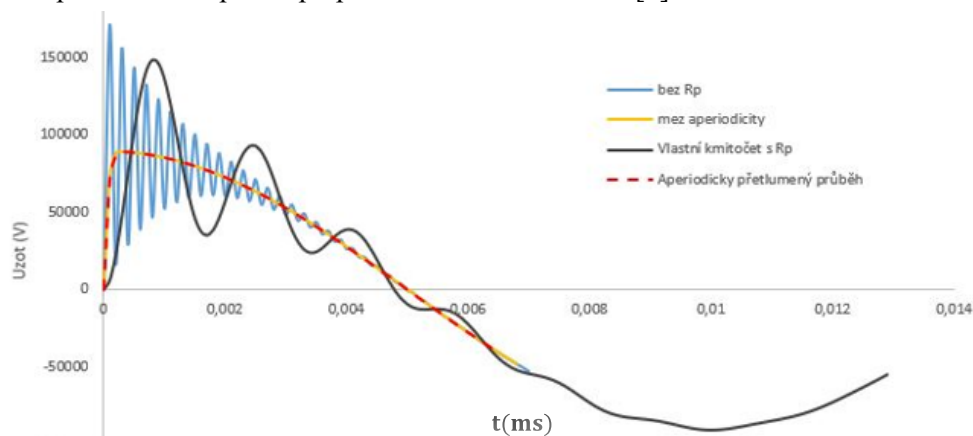
$b$  – vzdálenost místa úderu blesku od stožáru ( $m$ )

Poslední možností je úder blesku do stožáru nebo zemnicího lana. Zemnicí lano je jeden z možných způsobů, jak chránit vedení proti přímému úderu blesku do fázového vodiče. Umístění zemnicích lan se určuje podle ochranného úhlu  $\alpha$ . Pokud blesk zasáhne zemnicí lano, přepětí se ním šíří ke stožáru, kde už je situace obdobná případu, kdy blesk zasáhne přímo stožár. Napětí na stožáru zde bude závislé na odporu stožáru a země, náhradní indukčnosti a protékajícím proudem. Zpětný přeskok ze stožáru na vodič fáze nastane v případě, že izolační hladina izolátoru bude nižší než napětí na izolátoru. Můžeme tedy konstatovat, že ochrana vedení pomocí zemnicího lana není stoprocentní. [1]

Pro snížení účinků atmosférického přepětí se používá svodič přepětí LSA. Tento svodič je používán u venkovního vedení pro zamezení přeskoků izolátoru při úderu blesku. Další možností je svodič NGLA, což je provedení svodiče bez vnějších jiskřišť. Jsou obvykle vybaveny odpojovačem, který umožní odpojení při přetížení svodiče. [2]

### 1.1.2 Spínací přepětí

Spínací přepětí vznikají ve všech typech sítí. Vyskytují se během spínacích akcí a skládají se většinou z velmi tlumených kmitů s frekvencemi až do několika kHz a velikostí až  $k = 3$ . V případě indukčního spínání může spínací přepětí dosáhnout až  $k = 4$ . [3]



Obrázek 1: Průběhy zotaveného napětí při vypínání obvodu.

Na obrázku 1 je znázorněn průběh zotaveného napětí na kontaktech vypínače při vypínání elektrického obvodu. Z hlediska vypínání nastává nejhorší případ při vypínání periodického průběhu, protože tento průběh vytváří přepětí.

### 1.1.3 Dočasná přepětí

Vznik dočasných přepětí je způsoben oscilací sdružených napětí. Dočasná přepětí také vznikají ferorezonancí a při kývání synchronních strojů. Touto problematikou se podrobněji nebudu zabývat, jelikož to nespadá do obsahu mé práce. Doplním pouze, že při skokovém zvýšení momentu na hřídeli dojde k přechodovému ději, při kterém otáčky stroje a zátěžný úhel zakmitají. Tomuto ději říkáme kývání synchronního stroje. Kývání způsobuje proudové rázy, které se mohou blížit až k hodnotám zkratového proudu. Dalším zdrojem dočasných přepětí je porucha zemního spojení [3]. Při jednofázovém zemním spojení dochází v síti s izolovaným uzlem k nesouměrnosti v síti a nárůstu napětí v nepostižených fázích na velikosti sdruženého napětí. Toto přepětí může trvat i několik minut, do okamžiku, kdy obsluha vedení vypne síť, nebo opraví poruchu.

### 1.1.4 Přechodná přepětí

Krátkodobá přepětí trvající maximálně milisekundy. Vyskytují se jako rázová vlna i jako oscilační přepětí. Obvykle jsou vysoce tlumené a mohou být okamžitě následovány dočasným přepětím. Mezi přechodná přepětí můžeme řadit atmosférická a spínací přepětí. [6]

## 1.2 Způsoby omezení přepětí

Chránit vedení proti přepětí lze v podstatě několika způsoby. Prvním způsob je chránit vedení již v místě vzniku např. po úderu blesku, a to stíněnými vodiči. Tento způsob se vyplatí pouze v systémech vysokého napětí. Ochrana stíněnými vodiči v systémech středního napětí není obecně příliš účinná. Vzhledem k malému rozestupu mezi stíněnými vodiči a vodičem vedení přeskóčí blesk ze stíněného vodiče na vodič vedení. Kromě toho taky nelze vyloučit indukované přepětí ze stíněného vodiče ve vodiči vedení. V systémech středního napětí je tedy nejúčinnější použití přepětíových svodičů. U synchronních strojů se urychluje kývání, které způsobuje proudové rázy, tlumičem na rotoru stroje. Tlumič si představme jako kotvu nakrátko, která má tyče v pólových nástavcích, do níž se při kývání indukují proudy. Energie se zde maří v odporech tyčí na teplo. [3]

## 2. Svodiče přepětí

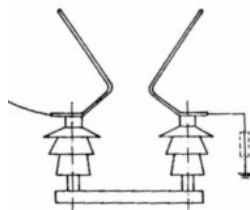
Svodič přepětí, jiným názvem bleskojistka, je elektrický přístroj nacházející se v elektrické síti, za účelem zamezení vzniku přepětí a jeho účinkům. Bleskojistka má schopnost chránit proti přepětí do určité vzdálenosti před i za bleskojistkou. Této schopnosti se říká ochranné působení bleskojistky. Závisí na rychlosti šíření vln na vedení, strmosti vlny a zbytkovém napětí. Bleskojistka se zapojuje paralelně k chráněnému zařízení, a zároveň co nejbližší, abychom toto zařízení efektivně chránili před účinky přepětí. [3]

### 2.1 Druhy bleskojistek

Známe několik druhů svodičů, které si dále rozebereme, a to růžkové jiskřiště, Torokovu trubici, ventilovou bleskojistku a metaloxidový svodič přepětí. Jednotlivé svodiče jsou řazeny od nejjednodušších k neúčinnějším. Toto uspořádání souvisí s vývojem v materiálové a technologické oblasti.

#### 2.1.1 Růžkové jiskřiště

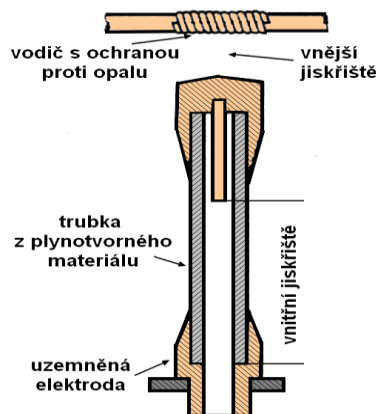
Toto jiskřiště je nejlevnější svodičem, protože funguje na velmi jednoduchém principu. Nastavením vzdáleností dvou elektrod, z nichž je jedna uzemněná, se nastavuje hladina napětí, při které dojde k přeskočení. Toto provedení má ale jednu hlavní nevýhodu. Po svedení přepětí zde není proud nijak omezen, tudíž může způsobit zkrat. [1] [5]



Obrázek 2: Růžkové jiskřiště [11]

#### 2.1.2 Torokova trubice

Torokova trubice odstraňuje hlavní nevýhodu růžkového jiskřiště, a tedy dokáže zhasnout oblouk. Konstrukci si můžeme představit jako dvě do série zapojené jiskřiště s nastavenými doskoky. Vnější jiskřiště odděluje trubici, ve které je umístěno vnitřní jiskřiště od stálého působení zdroje. Při vzniku výboje se začne odpařovat vnitřní povrch stěn a uvolněné plyny vyfouknou oblouk ven. Vznik zkratu je téměř vyloučen, ale proud dodávaný ze sítě není do průchodu nulou ničím omezen a dosahuje hodnot řádu kA. [1] [5]



Obrázek 3: Torokova trubice [9]



### 2.1.3 Výbojové bleskojistky

Na ochranu měřících přístrojů a obsluhy při měření na vysokém napětí se používají výbojové bleskojistky. Někdy je můžeme objevit v nízkonapěťových sítích mezi přepětovými ochranami. Jejich zapalovací napětí je mezi 90 až 700 V. Elektrody čočkového tvaru jsou uloženy v keramickém válečku, který je naplněn interním plynem a pro stabilitu zapalovacího napětí obsahují malé množství radioaktivního prvku (Americium) pro ionizaci prostoru. [1]

### 2.1.4 Ventilové bleskojistky

Složitější a zároveň dražší jsou ventilové bleskojistky. I přes jejich vyšší cenu jsou to používanější bleskojistky z důvodu jejich spolehlivosti. Konstrukce se skládá ze sériově zapojených jiskřišť a několika odporových bloků shodně zapojených za sebe. Pro menší napětí se může objevit ventilová bleskojistka s jedním jiskřištěm a jedním nelineárním odporem. U této bleskojistky využíváme nelineární charakteristiky SiC odporu v elektrotechnice známý jako varistor. Varistor je polovodičová součástka, jejíž odpor závisí na velikosti napětí. Pokud se zvyšuje napětí na varistoru, proud zpočátku roste velmi pomalu. V okamžiku, kdy napětí překročí zapalovací hodnotu na jiskřištích, klesne vnitřní odpor a proud, který začne rychle narůstat, je sveden do země. Napětí se dál zvětšuje velmi pomalu, je téměř konstantní. Po průchodu střídavého proudu na jiskřištích nulou se odpojí varistorové bloky od napětí, a tudíž se přeruší proud svedený do země. [5]

### 2.1.5 Metaloxidový svodič přepětí

S vývojem polovodičových součástek se metaloxidový svodič přepětí začal objevovat na konci sedmdesátých let. Tento svodič odstraňuje nedostatky svodičů přepětí s nelineárními odpory z karbidu křemíku a jiskřišti. Porcelánové kryty jsou nahrazovány kryty z polymerního materiálu. Ovšem v přenosových sítích pořád převládají klasické porcelánové kryty. V sítích vysokého napětí je stále zapojené velké množství svodičů s jiskřišti. Nicméně již nejsou vyráběny. Podrobným popisem, funkcí a technologií výroby se budu zabývat v následujících kapitolách. [2]

## 2.2 Popis MO svodiče

Metaloxidový svodič přepětí, se skládá ze dvou částí. První je aktivní část, která se skládá z jednoho nebo více ZnO bloků válcového tvaru zapojených sériově. Druhá část je kryt, izolující aktivní část od okolí a zároveň zaručuje mechanickou pevnost celého svodiče.

Hlavní rozdíl v konstrukci oproti ventilovým bleskojiskám je ten, že nejsou potřeba žádná jiskřiště, tudíž konstrukce metaloxidového svodiče je mnohem jednodušší. Nově navržené svodiče byly možné realizovat pouze díky vývoji MO rezistorů a použití polymerního materiálu na kryty. Jako výhodu můžeme brát to, že svodič přepětí má nyní pouze jeden "aktivní" prvek. Na druhou stranu to znamená, že rezistory MO musí vykonávat všechny funkce, které byly dříve provedeny různými částmi ventilové bleskojistky. Proto jsou na MO rezistory kladeny velké nároky, což činí z výroby a dalšího vývoje velmi složitý a nákladný proces.

Životnost správně navrženého svodiče může být za normálních pracovních podmínek desítky let. Svodič přepětí pracuje za normálních pracovních podmínek, když: teplota v okolí je v rozmezí od 40 °C do -40 °C, svodič je instalován v nadmořské výšce do jednoho kilometru, rychlost větru je menší než 120 km/h, frekvence střídavého napětí je mezi 48-62 Hz, napětí na svorkách není větší než trvalé provozní napětí  $U_c$  a je ve vertikální poloze. V případě, že jedna z těchto podmínek není splněna, svodič pracuje za abnormálních pracovních podmínek. To může vést k jeho poškození ať už atmosférickými

vlivy (vichřice, teplota, sluneční záření), nebo elektrickými (frekvence nižší než 48 Hz, vyšší než 62 Hz, nebo napětí na svorkách větší než  $U_0$ ). V místech, kde je svodič v blízkosti tepelných zdrojů a teplota zde překračuje 40 °C, je pro správný chod svodiče doporučeno zvýšit trvalé provozní napětí o 2 % při každém nárůstu teploty okolí o 5 °C. Se vzrůstající teplotou se snižuje teplotní mez tepelné stability svodiče. Mechanická stabilita musí zaručit, aby svodič správně fungoval i v oblastech, kde dochází k zemětřesením. Tyto zařízení mají posílenou základní desku a jsou testovány i proti vibracím a nárazům. [3]

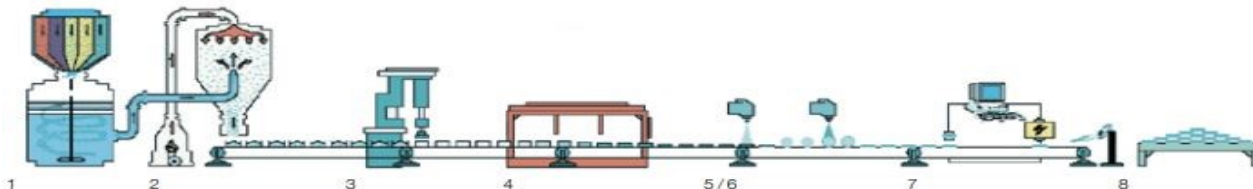
Jako každé zařízení i bleskojistka se může přetížit. Přetížení nastane v případě, když bleskojistkou prochází extrémně vysoké bleskové proudy nebo bleskové proudy s velmi velkým nábojem, na které daná bleskojistka nebyla dimenzována. Dalším případem přetížení může být tzv. přechod napětí, což je zkrat mezi dvěma různými úrovněmi napětí (např. pád vodiče 110 kV na vedení 22 kV). Ve všech zmíněných případech dochází k velkému návalu energie, která je větší než energetická kapacita bleskojistky. Přetížené MO rezistory poté jiskří, nebo se rozpadají a vytvářejí trvalý zkrat, který zapříčiní oblouk uvnitř bleskojistky. Proud tohoto oblouku je definován zkratovým výkonem. U bleskojistik se silikonovým krytem nehrozí nebezpečí výbuchu nebo rozbití při přetížení, jelikož mezi aktivní částí a silikonovou izolací není vzduchový prostor. Díky této speciální konstrukci jsou tyto bleskojistky chráněny před výbuchem i v případech nejvyšších zkratových proudů. [3]

Abychom svodič přepětí zbytečně nepřetěžovali, musíme vybrat správnou energetickou třídu. Energetických tříd, které vyjadřují schopnost absorpce atmosférických, spínacích a dočasných přepětí, je podle normy ČSN EN 60099–5 ed2 celkem 5. Její jednotka je kJ/kV. S rostoucí hladinou napětí sítě, ve které je svodič instalován, musí růst i energetická kapacita svodiče. Třídy jsou navrženy pro širokou škálu hladin napětí v síti od třídy 1, která je pro malé nízkonapěťové sítě, až po třídu 5, která je pro obrovské sítě nad 400 kV. [3]

Pokud chceme, aby svodič pracoval spolehlivě bez poruch a bezpečně, musí být schopnost absorpce energie větší, než jaká je očekávaná v provozu.

### 2.2.1 Metaloxidový rezistor (Varistor)

Stlačením a následným spečením prášku, skládajícího se z kovových oxidů, vznikne blok válcového tvaru – varistor. Procentuální složení oxidů je přibližně 90 % ZnO a 10 % jiných kovových oxidů (kobalt, antimon atd.). MO rezistor se skládá z více těchto bloků zapojených za sebou. Velikost jednotlivých bloků vychází z parametrů, na které bude daný svodič použit. Výroba takových bloků je proto dosti složitým procesem.



Obrázek 4: Technologický postup výroby varistorových bloků [3]

- |                                |  |
|--------------------------------|--|
| 1. Míchání prášku oxidů kovů   | 5./6. Pokovování kontaktních ploch/ Povrchová úprava |
| 2. Sušení prášku rozprašováním | 7. Konečné testy MO rezistorů                        |
| 3. Stlačení                    | 8. MO rezistory připraveny k použití                 |
| 4. Spékání                     |  |

Průměr rezistorů MO závisí na proudu, jejich výška na napětí a objem bloků (aktivní části) určuje velikost energetické kapacity svodiče. Velikost odporových metaloxidových bloků se pohybuje mezi dvěma až jedenácti centimetry v průměru a výšce do pěti centimetrů. Například MO rezistory, vyráběné firmou ABB, mají průměr od 3,8 do 10,8 cm a výšku mezi 2,3 až 4,6 cm. Ve výjimečných speciálních případech jsou MO rezistory děleny na výšku 8 mm. [3]

Kontaktní plochy MO rezistorů jsou pokovovány hliníkem a povrch obalu je pokryt sklem. Různé velikosti MO rezistorů vidíme na následujícím obrázku.



Obrázek 5: Varistorové bloky od firmy ABB [3]

Varistory mají nelineární voltampérovou charakteristiku. Tuto charakteristiku definuje následující vzorec:

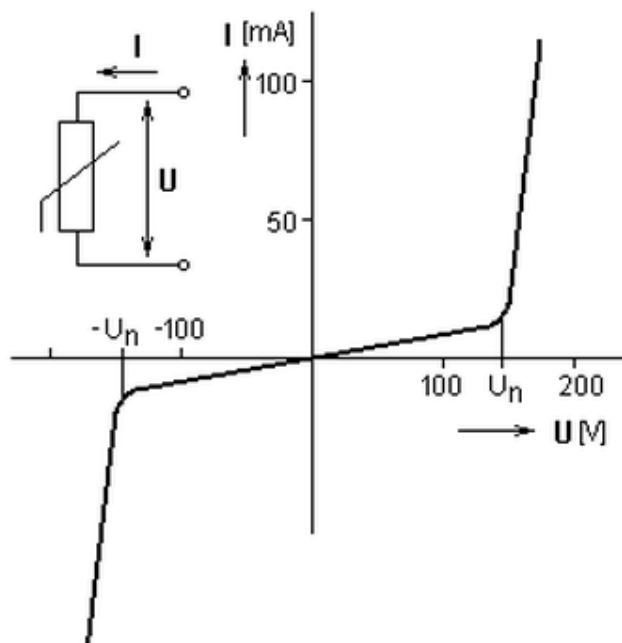
$$I = k * U^{\alpha} \quad (4)$$

$I$  - proud

$k$  – lineární činitel (závisí na tvaru a velikosti) [-]

$U$  – napětí

$\alpha$  – nelineární činitel (závisí na materiálu) [-]



Obrázek 6: Obecná voltampérová charakteristika varistoru [10]

Z přiloženého obrázku 6 můžeme zjistit princip působení varistoru. Je to vlastně napětově závislý rezistor. Charakteristika je vysoce nelineární, avšak symetrická, takže varistor může pracovat v obou směrech (tzn. pro obě polarity přepětí či bleskového výboje). V okolí nuly má vysoký odpor ( $10^9$  až  $10^{12} \Omega$ ) a teče ním zanedbatelný svodový proud v řádech  $\mu A$ . Při dosažení prahového napětí  $U_n$  s určitou tolerancí poklesne odpor na jednotky ohmů a radikálně se změní strmost charakteristiky. Rychlost zareagování je řádově v nanosekundách. Varistorem začne protékat proud a napětí roste již velmi pomalu. Při dlouhodobém provozování nad prahovým napětím se varistor degraduje. Degradaci může rovněž způsobit časté namáhání přepětíovými impulzy, což vede ke snížení prahového napětí, které je nežádoucí. Z výše uvedeného principu vyplývá, že je použití varistorů vhodné ve svodičích přepětí. S dobře nastaveným prahovým napětím zamezíme působení škodlivého přepětí.

### 2.2.2. Typy konstrukcí MO svodičů

Podle normy ČSN EN 60099–5 ed2 máme několik typů konstrukci metaloxidových svodičů. V praxi můžeme narazit na svodiče v porcelánovém plášti, které postupně s vývojem nových materiálů přechází k modernějším v polymerovém plášti, GIS svodiče, svodiče ponořené do kapaliny, odpojitelné a deadfront svodiče. Ovšem existují také MO svodiče s vnitřním i vnějším jiskřištěm. [2]

#### Svodiče s porcelánovým pláštěm

Jako první se zmíním o porcelánovém svodiči. Jeho aktivní část se skládá z jednoho nebo více již dříve popisovaných MO rezistorových prvků složených do sloupců. Existují také typy svodičů v porcelánovém krytu, které mají sloupců několik a jsou spojeny paralelně za účelem zvětšení teplotní kapacity a snížení proudové hustoty proudového impulsu. Prostor mezi sloupcem varistorů a porcelánovým krytem je vyplněn nejčastěji plynným médiem (vzduch, dusík). Proto musí být tento svodič testován na netěsnosti konstrukce s ohledem na možný vznik zkratového proudu a destrukci celého svodiče. Se svodiči, které jsou vyplněny plynem jsou dodávány i přetlaková zařízení, která zajišťují, že svodič nebude poškozen energetickým přetížením při přeskoku nebo průrazu na aktivní část. Prostor může být také vyplněn i pevným materiálem např. silikonovou pryží. Plášť, který chrání aktivní část od okolního prostředí, musí splňovat požadavky mechanické pevnosti, přeskokové vzdálenosti, povrchové vzdálenosti, těsnosti proti vniknutí vlhkosti a nečistot a uvolnění tlaku při přetížení. Pokud jsou všechny zmíněné parametry splněny, svodič může být bezpečně provozován. Plášť svodiče je jeden z nejlepších chránících izolantů v elektroenergetice. Pokud bychom vyráběli ideální izolant proti vlhkosti a nečistotám, životnost bleskojistik by byla téměř nekonečná. [2] [3]



Obrázek 7: Porcelánový svodič přepětí [12]

### Svodič v polymerovém plášti

Jejich rozvoj začal v 80. letech minulého století, a hlavně v distribučních sítích se používají jen výhradně tyto svodiče. Pokud jde o znečištění, je silikon nejlepší izolační materiál. Hlavně proto, že je vodoodpudivý. V dnešní době se používá několik typů konstrukcí, které se mohou rozdělit na tři hlavní. [2]

Trubková konstrukce má původ svého názvu odvozeného od vlastní konstrukce. Aktivní část je v trubce ze syntetického materiálu, která je posilněna skleněnými vlákny. Celá trubka je dále pokryta izolačním materiálem, v mezeře mezi aktivní částí a krytem, je plynné médium, tudíž se tato konstrukce podobá porcelánovým svodičům. Aktivní část ovinuté konstrukce je pokryta skleněnými vlákny a epoxidovou pryskyřicí, která po vypečení přemění tento celek na tuhé těleso. Tato konstrukce má ale nevýhodu, že se násilně rozpadá, když se MO bloky přetěžují. [3] [2]

U klecové konstrukce se aktivní část mechanicky drží se smyčkami nebo pásy vyztuženými skleněnými vlákny. Syntetický materiál např. silikon je přímo tvarován na MO bloky. Tento typ tvarování má výhodu, že ve svodiči není žádný plyn, tudíž nemusíme řešit problémy s těsněním. Neexistují zde žádné vrstvy, do kterých by mohla pronikat vlhkost. Nebezpečí výbuchu nebo poškození krytu je tak velmi malé. [3]



Obrázek 8: Svodiče přepětí v silikonovém plášti [3]

Na obrázku 8 vidíme tři svodiče od firmy s odlišným pokrytím. Svodič na pravé straně je určen do vnitřních prostorů. Prostřední svodič je vybaven stříškami pro venkovní použití. Ty má také svodič vlevo, ale můžete si všimnout, že se střídají menší s většími. Tyto typy se instalují do míst, kde se počítá s velkým znečištěním. Nutno dodat, že vnitřní konstrukce je stejná.

### GIS Svodič

Jedná se o svodiče s kovovým pouzdem, většinou z hliníku nebo oceli, naplněné plynem SF<sub>6</sub>, přičemž jejich životnost by měla být minimálně 30 let. Jsou vhodné pro ochranu plynem izolovaných rozvaděčů proti přepětiovým vlnám.



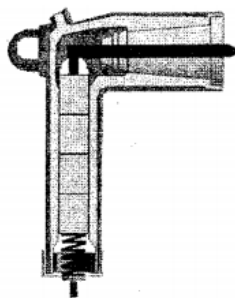
Obrázek 9: Plynem plněný svodič přepětí od firmy ABB [8]

### Svodiče ponořené do kapaliny

Tyto svodiče se používaly hlavně v USA a později v Japonsku. Svodič byl instalován přímo v olejové nádobě transformátoru blízko chráněného vinutí. Tyto svodiče si již moc nepoužívají, jelikož mínusy zde převažují nad plusy. Za jediný kladný přínos tohoto svodiče můžeme označit to, že je instalován velmi blízko vinutí. Nevýhodou je provoz v oleji, který se navíc zahřívá a zkratové vlastnosti. [2]

### Odpojitelné a deadfront svodiče

Jedná se o konstrukčně odlišné svodiče, ale mají společnou jednu věc. Tyto svodiče můžeme kdykoliv připojit a kdykoliv odpojit od sítě, tudíž nejsou k síti nepřetržitě připojeny vodiči, ale zástrčkami a posuvnými kontakty. Nejčastěji se využívají v rozvaděcích a obecně ve vnitřních prostorech. Liší se pláštěm, oblastním použitím a možnostmi odpojení od sítě. Odpojitelné svodiče se používají v Evropě. Pokud s nimi chceme manipulovat (odpojení, připojení), je třeba síť vypnout. Jsou vyráběny buď ve stíněných, nebo izolovaných pláštích. Na rozdíl od deadfront svodiče, který je vyráběn pouze ve stíněném plášti a používán v USA. Posledním rozdílem je to, že při manipulaci v síti s nimi nemusíme síť vypnout. [2]



Obrázek 10: Deadfront svodič přepětí [2]

#### 2.2.2 Parametry MO svodiče

Ke správnému návrhu bleskojistky a jejího následného použití potřebujeme znát jejich základní parametry. Mezi základní parametry řadíme trvalé provozní napětí, jmenovité napětí, trvalý proud svodiče, zbytkové napětí, jmenovitý výbojový proud svodiče, nejvyšší napětí zařízení a následný proud svodiče. Všechny tyto parametry jsou definovány v dříve zmíněné normě. Správně navržený svodič přepětí musí splňovat elektrické i mechanické požadavky.

**Trvalé provozní napětí  $U_c$  (kV)** – Stanovená povolená efektivní hodnota síťového napětí, kterou lze trvale aplikovat na svorky svodiče v souladu s IEC 60099-4 a 60099-6. [2]

**Jmenovité napětí svodiče  $U_r$  (kV)** – Maximální povolená efektivní hodnota střídavého napětí mezi svorkami, při kterém má správně fungovat za podmínek dočasného přepětí v souladu se zkouškami provozním namáháním podle IEC 60099-4 a 60099-6. [2]

**Trvalý proud svodiče ( $\mu A$ )** – Proud protékající svodičem přepětí, když je připojen k trvalému provoznímu napětí. Skládá se z odporové a kapacitní složky. Jeho hodnota se vlivem teploty, znečištění a parazitní kapacitou mění. Někdy označován jako svodový. [2]

**Ochrana hladina svodiče  $U_{pl}$**  – Maximální napětí na svorkách svodiče při průtoku jmenovitého výbojového proudu svodiče.

**Třída vybití vedení LD** – rozděluje svodiče do pěti tříd podle schopnosti absorbované energie

**Jmenovitý výbojový proud svodiče  $I_n$  (kA)** – Vrcholová hodnota atmosférického proudového impulsu, která se používá pro klasifikaci svodiče podle IEC 60099-4, IEC 60099-6, a IEC 60099-8. [2]

**Zbytkové napětí svodiče  $U_{res}$  (kV)**– Vrcholová hodnota napětí, která se objeví na svorkách svodiče při průchodu výbojového proudu. [2]

**Následný proud svodiče (A)** – Proud tekoucí z připojeného zdroje skrz svodič následně po průchodu výbojového proudu [2]. U svodičů se SiC bloky je jeho hodnota okolo 100 A. Hodnota u svodičů se ZnO bloky je v řádech jednotek ampérů.

## 2.3 Testování svodičů

Poslední fází vývoje nového svodiče je jeho zkouška. Při jeho testování sledujeme, zda elektrické i mechanické hodnoty svodiče dodržují platné normy. Jelikož je tato práce zaměřena na MO svodiče, zmíním zde hlavně zkoušky svodičů s polymerovým pláštěm.

### 2.3.1 Rutinní testy

Tyto testy se provádějí na každém svodiči nebo částech svodiče (například na MO rezistorech). Podle IEC musí být provedeny tyto testy:

#### Měření referenčního napětí

Referenční napětí se měří referenčním proudem specifikovaným výrobcem. Naměřené hodnoty by měly být v rozsahu specifikovaném výrobcem. V ABB se toto měření provádí na každém MO rezistoru všech MO svodičů. [3]

#### Měření zbytkového napětí

Zbytkové napětí se měří na každém MO rezistoru normalizovaným proudovým impulzem  $8\mu s/20\mu s$ . Zbytková napětí jednotlivých MO rezistorů se sečtou. Tento součet představuje celkové zbytkové napětí svodiče. [3] Tento parametr budu měřit v závěrečné praktické části této práce.

#### Zkouška těsnosti (kontrola těsnosti)

Tento test nám zobrazuje, jak je konstrukce svodiče těsná. Většinou si výrobce volí postup tohoto testu, který musí být ale dostatečně průkazný, že je svodič v pořádku. Tato zkouška se nevztahuje na svodiče, které jsou zcela tvarovány v silikonu u tzv. klecové konstrukce. [3]

#### Měření částečných výbojů

V případě svodičů středního napětí je zkouška prováděna na každém kompletním svodiči. Tato zkouška se provádí při 1,05násobku trvalého provozního napětí  $U_c$ . Naměřená hodnota vnitřních částečných výbojů nesmí překročit 10pC podle IEC. V ABB jdou s touto hodnotou ještě níž. Jejich svodiče musí mít hodnotu náboje pod 5pC. [3]

Kromě nutných testů považovaných za minimální požadavek IEC provádí společnost ABB i dodatečné a speciální testy MO rezistorů a svodičů, aby zajistila vysokou kvalitu. Mezi dodatečné testy u společnosti ABB patří měření celkového svodového proudu  $I_c$  na každém svodiči při trvalém provozním napětí  $U_c$ , zkouška schopnosti manipulace s energií MO rezistorů proudovými impulzy a zkouška zkráceného stárnutí u některých svodičů z každé výrobní šarže. [3]

### **2.3.2 Speciální testy**

V rámci vývoje svodičů byly ve spolupráci s uživateli a výzkumnými ústavy provedeny další testy. Tyto testy byly provedeny za účelem zkoumání chování MO svodičů se silikonovými kryty za zvláštních podmínek.

#### **Teplotní cykly**

Stavba a také materiály, použité pro MO pojistky firmy ABB, tolerují teploty do  $-60\text{ }^{\circ}\text{C}$  a extrémní změny teploty mezi  $-40\text{ }^{\circ}\text{C}$  a  $+40\text{ }^{\circ}\text{C}$  bez jakýchkoliv změn mechanických a elektrických vlastností. Došlo se k výsledku, že konstrukce svodiče nebyla v průběhu cyklického zmrazování nijak poškozena ledem. [3]

#### **Testy vlhkosti**

U těchto testů se dokazuje, že elektrické vlastnosti svodičů nejsou ovlivněny během dlouhého působení relativní vlhkostí okolo 90 % a pravidelnému vystavování dešti. Tyto testy mohou trvat i více než 2 roky. [3]

#### **Chování v ohni**

Silikon je samozhášivý materiál. Pokud se svodič se silikonovým povrchem dostane do styku s ohněm a začne hořet, pak hořící silikon zhasne během jedné minuty. Na spálené ploše se nachází pouze netoxický vypálený křemík, přesněji řečeno křemenný písek. Analýzy kouře dokázaly, že při požáru nevznikají žádné toxické plyny. [3]

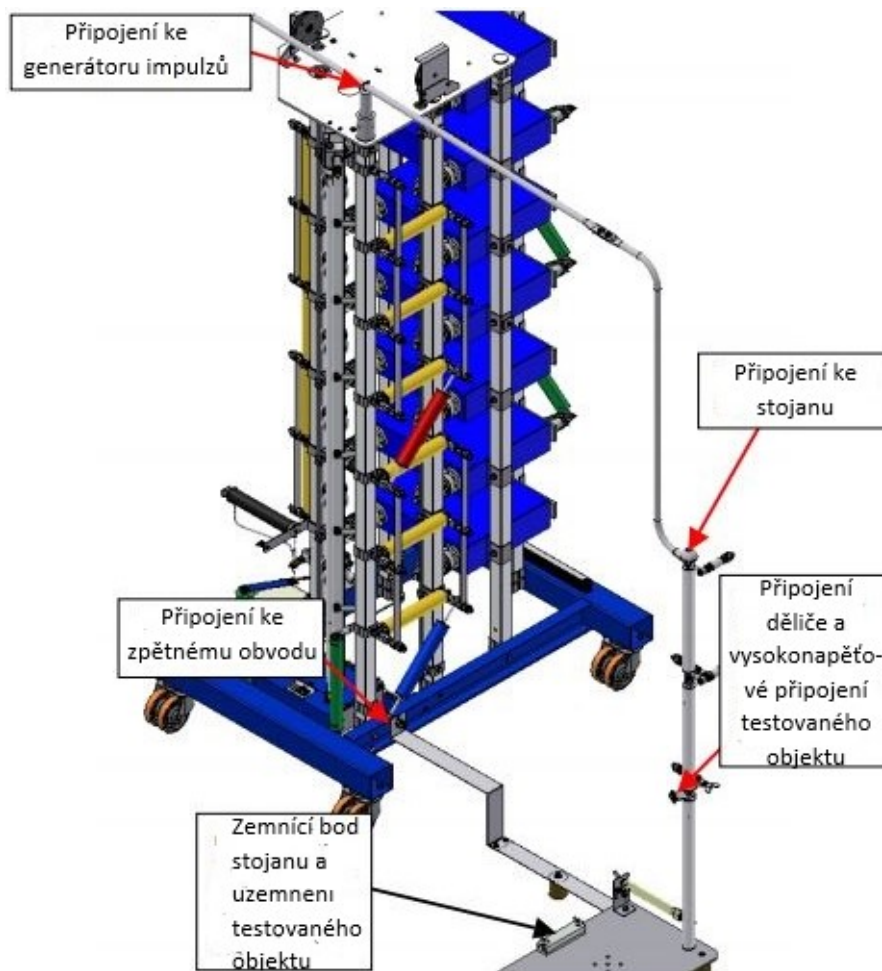


### 3. Měření zbytkového napětí bleskojistky

Měření zbytkového napětí bylo provedeno na třech svodičích s jiným trvalým provozním napětím. Zbytkové napětí je vrcholová hodnota napětí, která se objeví na svodiči po průchodu jmenovitého výbojového proudu. K měření zbytkového napětí svodiče je třeba zdroj vysokonapěťových impulzů. Tyto impulzy simulují možné situace, které mohou nastat za běžného provozu (úder blesku, spínací přepětí atp.). Naše škola disponuje v laboratoři techniky vysokého napětí v budově “L“ SSG-ZUS generátorem, který jsem využil pro své měření.

#### 3.1 Impulzní Generátor SSG-ZUS

Zdroj vysokonapěťových impulsů se používá ve speciálních laboratořích při experimentech či ve výuce v oblasti vysokého napětí. SSG ZUS je přídatný komponent generátoru impulsního napětí typu SGS pro generování impulsních proudů k testování metaloxidových svodičů přepětí a vysokou hladinou zbytkového napětí. Tento generátor dokáže vytvořit impulzní proud od 5 kA až do 15 kA při tvaru vlny 4/10 nebo 8/20  $\mu$ s pro určení zbytkového napětí svodiče přepětí až do 100 kV. Generátor není určen do venkovních prostor. Pro správnou funkčnost by se měl generátor provozovat při teplotách mezi -5 až +40 °C a relativní vlhkosti nepřesahující 90 %, kdy nesmí dojít ke kondenzaci vody. Díky svým rozměrům a podstavě na kolečkách je generátor flexibilní k doručení na místo zkoušky.[7]



Obrázek 11: Impulzní generátor SSG-ZUS [7]

Pro testování svodičů přepětí může být impulzní generátor proudu provozován v několika konfiguracích, které se liší v zapojení a jmenovitých hodnotách prvků R, L. Vhodnou konfiguraci volíme podle zbytkového napětí zkoušeného svodiče.

Tabulka 1: *První varianta zapojení impulzního generátoru proudu*

Zapojení generátoru	2s3p
Tvar vlny	8/20 $\mu$ s
Maximální hodnota proudu	$I_{max} = 15 \text{ kA}$
Zbytkové napětí svodiče	$15 \text{ kV} < U_{Res} < 60 \text{ kV}$
Zapojené cívky	1x 12 $\mu$ H + 1x 25 $\mu$ H
Zapojené rezistory	2x 6 $\Omega$ v paralelním zapojení

Tabulka 2: *Druhá varianta zapojení impulzního generátoru proudu*

Zapojení generátoru	2s3p
Tvar vlny	8/20 $\mu$ s
Maximální hodnota proudu	$I_{max} = 15 \text{ kA}$
Zbytkové napětí svodiče	$U_{Res} < 12,5 \text{ kV}$
Zapojené cívky	1x 3 $\mu$ H + 1x 12 $\mu$ H + 1x 25 $\mu$ H
Zapojené rezistory	2x dva paralelně zapojené rezistory 6 $\Omega$

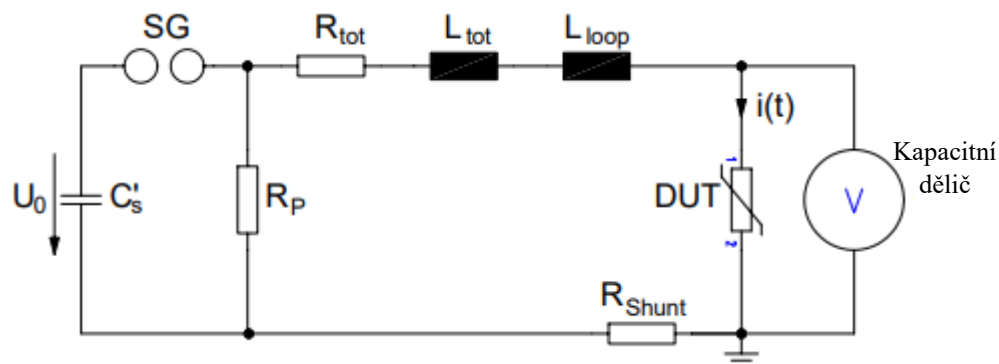
Tabulka 3: *Třetí varianta zapojení impulzního generátoru proudu*

Zapojení generátoru	2s3p
Tvar vlny	8/20 $\mu$ s
Maximální hodnota proudu	$I_{max} = 15 \text{ kA}$
Zbytkové napětí svodiče	$12,5 \text{ kV} < U_{Res} < 15 \text{ kV}$
Zapojené cívky	1x 12 $\mu$ H + 1x 25 $\mu$ H
Zapojené rezistory	2x 6 $\Omega$ v paralelním zapojení + 2x 3 $\Omega$ paralelně

Tabulka 4: *Čtvrtá varianta zapojení impulzního generátoru*

Zapojení generátoru	3s2p
Tvar vlny	8/20 $\mu$ s
Maximální hodnota proudu	$I_{max} = 10 \text{ kA}$
Zbytkové napětí svodiče	$60 \text{ kV} < U_{Res} < 100 \text{ kV}$
Zapojené cívky	3x 25 $\mu$ H
Zapojení rezistory	1x 3 $\Omega$

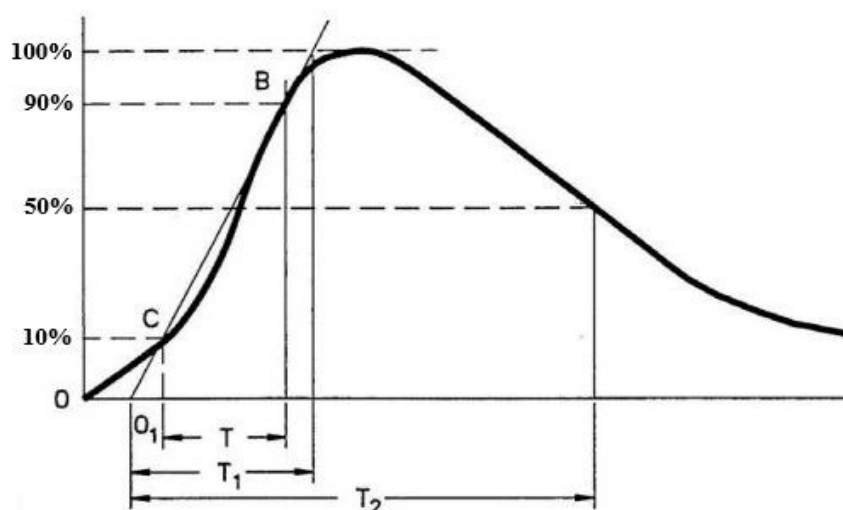
Princip generování impulzních proudů se dá pochopit z příloženého zjednodušeného náhradního schématu na obrázku 12. Obvod se skládá z jiskřiště a prvků R, L, C. DUT představuje testovaný objekt, v tomto případě svodič přepětí. Impulz vznikne tím, že kondenzátor  $C_s$  se bude nabíjet na námi přiloženou hodnotu zdrojem  $U_0$  do doby, než dojde k přeskoku na jiskřišti SG (spark gap). Jiskřiště zde tedy zastává úlohu spínače. Impulz dále postupuje ke zkoušenému objektu. Nastavením hodnot R a L můžeme měnit tvar impulzní vlny. Kapacitní dělič slouží k měření zbytkového napětí.  $R_{Shunt}$  je bočník, přes který se změří jmenovitý výbojový proud bleskojistkou. [7]



Obrázek 12: Náhradní schéma zapojení impulzního generátoru s testovaným zařízením [8]

### 3.2 Atmosférický proudový impulz

Atmosférický proudový impulz vygenerovaný na SSG-ZUS je určen pro simulování atmosférických výbojů pohybujících se po vedení při úderu blesku. Pro měření zbytkového napětí na svodiči přepětí se podle normy ČSN EN 60060-1 se využívá normalizovaný impulz 8/20 popř. 4/10  $\mu\text{s}$ . V mém případě byl generován impulz 8/20  $\mu\text{s}$ .



Obrázek 13: Normalizovaný atmosférický proudový impulz 8/20  $\mu\text{s}$  [7]

Z obrázku 13 je zřejmé, že impulz je charakteristický strmým nárůstem z nuly do maximální hodnoty  $I_M$  a poté klesá k nule. Případný překmit v záporné půlvlně by neměl překročit 20% amplitudy. Dalšími charakteristickými veličinami je doba čela a doba půltýlu.

$T$  – doba mezi 10 a 90% maximální proudové amplitudy

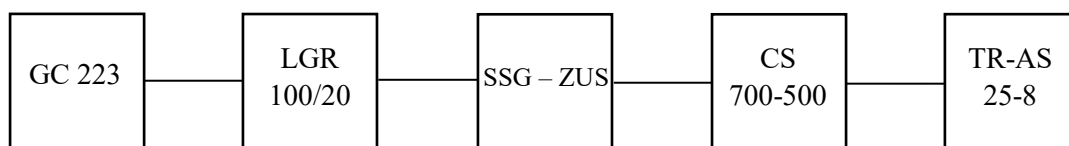
**Doba čela  $T_1$**  - Je to 1,25násobek doby. Tolerance této doby je  $\pm 10\%$ .

**Doba půltýlu  $T_2$** - je doba mezi skutečným počátkem  $O_1$  a 50 % maximální proudové amplitudy  $I_M$  v klesající části půlvlny. Tolerance této doby je také  $\pm 10\%$ .

**Skutečný počátek  $O_1$** - Počátek doby čela a doby půltýlu předcházející o 0,1  $T_1$  okamžik, kdy je proudová amplituda v 10 % své vrcholové hodnoty.

**Maximální proudová amplituda  $I_M$**  – Maximální vrcholová hodnota impulzního proudu. Tolerance této hodnoty je  $\pm 10\%$ .

### 3.3 Schéma a obrázky zapojení, použité přístroje



Obrázek 14: Blokové schéma zapojení pro měření zbytkového napětí

GC 223 - řídicí jednotka pro ovládání SSG-ZUS

LGR 100/20 - usměrňovač sloužící k nabíjení vysokonapětových kondenzátorů

SSG-ZUS – impulzní generátor, typ SGS 700/35 (v zapojení s rezistory, cívkami a testovaným svodičem)

CS 700-500 - kapacitní dělič, 500 pF

TR-AS 25-8 – Měřicí soustava k vyhodnocení měření

MWK a MWD 16;  $U_c = 16 \text{ kV}$ ,  $U_r = 20 \text{ kV}$

MWK a MVD 22;  $U_c = 22 \text{ kV}$ ,  $U_r = 27,5 \text{ kV}$

MWK a MVD 27;  $U_c = 27 \text{ kV}$ ,  $U_r = 33,8 \text{ kV}$

K měření bylo použito 6 svodičů pro 3 napětové hladiny trvalého provozního napětí (16, 22, 27 kV). V každé napětové hladině jsem měl k dispozici svodič pro vnitřní a venkovní provedení. Všechny omezovače byly testovány výrobcem podle třídy vybití 2, která dodává energii 5,5 kJ/kV. Jmenovitý výbojový proud při proudovém impulzu 8/20  $\mu\text{s}$  je 10 kA. Čím větší (vyšší) svodič je, tím větší má hodnotu trvalého provozního napětí. Důvodem je to, že při vyšším napětí musí snést vyšší energii.



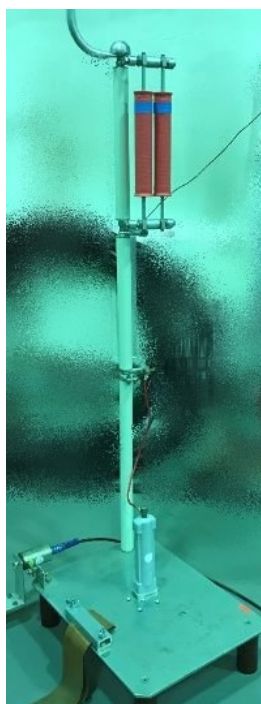
Obrázek 15: Testované svodiče přepětí

Podle katalogu výrobce bylo předpokládáno zbytkové napětí na svodiče. Pro nejnižší omezovač postačilo zapojení impulzního generátoru 2s3p. Pro zbývající dva se muselo zapojení přepojit na 3s2p, protože zbytkové napětí bylo předpokládáno přes 60 kV, což byla maximální hodnota zbytkového napětí na svodiči pro zapojení 2s3p.



Obrázek 16: SSG-ZUS v zapojení 2s3p

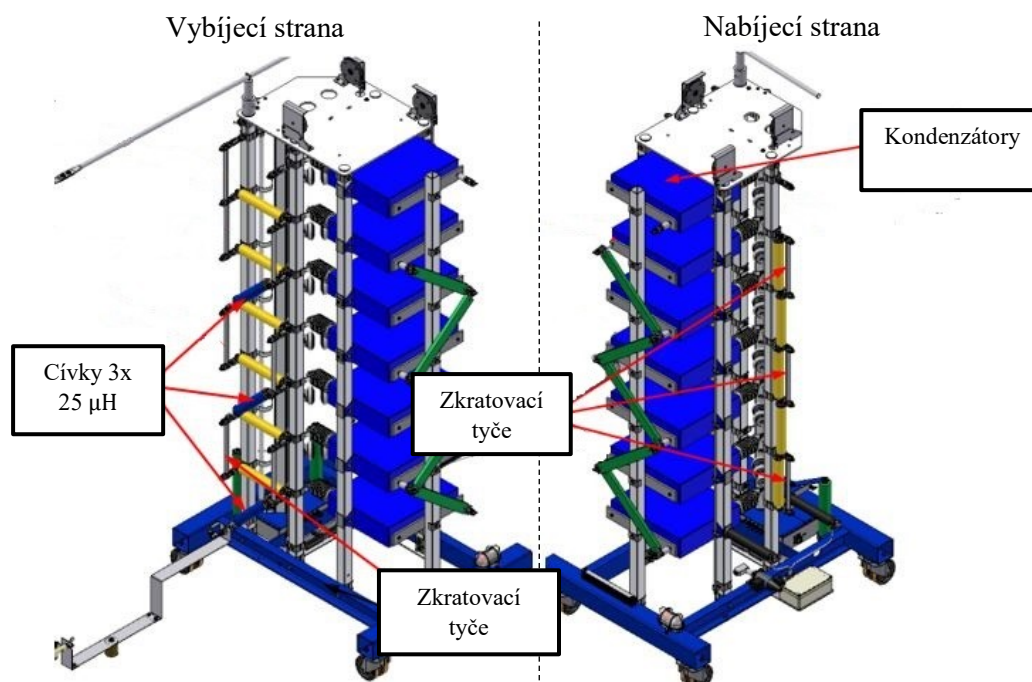
V tomto zapojení má generátor dvě cívky v sérii. Červená  $L_1 = 12 \mu\text{H}$  a modrá  $L_2 = 25 \mu\text{H}$ . Prvky rezistor a cívka lze jednoduše zapojovat či odpojovat díky plug-in systému. Šest kondenzátorů je zapojeno v serioparalelním zapojení. Kapacita jednoho kondenzátorů je  $1 \mu\text{F}$ .



Obrázek 17: Externí část impulzního generátoru pro zapojení 2s3p

Na externí části impulzního generátoru jsou v tomto zapojení paralelně dva rezistory s hodnotou odporu  $6 \Omega$ . Na testovací podložce je připraven testovaný svodič přepětí.





Obrázek 18: SSG-ZUS v zapojení 3s2p [7]

V tomto zapojení jsou připojeny ke generátoru 3 cívky s hodnotou  $25 \mu\text{H}$ . Kondenzátory jsou opět zapojeny sérioparalelně a jejich hodnota je shodná s předešlým zapojením. Došlo k přepojení zkratovacích tyčí po obou stranách generátoru (nabíjecí, vybíjecí). Na externí části generátoru ke změně nedošlo. Při bližším prozkoumání bylo zjištěno, že kondenzátory jsou dosti nafouklé, ovšem jak se ukázalo později, stále jsou plně funkční. V tomto zapojení může mít svodič přepětí zbytkové napětí až 100 kV.

### 3.4 Popis a postup měření zbytkového napětí

Zařízení, které nám dovolují měřit podobné úlohy, se nacházejí v budově L. Po zapojení první konfigurace 2s3p se trochu upravila jiskřiště na generátoru, neboť byla vyosená. Pokud by nedošlo k nápravě, mohlo by být toto měření ovlivněno. Lišila by se doskoková vzdálenost, než která by byla ve skutečnosti nastavena. Po poslední kontrole celého pracoviště se odebere zemní tyč a zamknou se dveře zkušební laboratoře. Během měření nesmí do laboratoře nikdo vstoupit. Řídící jednotka a měřicí soustava se nacházejí v 1. patře budovy. Po odemčení nouzového tlačítka se může spustit řídící jednotka a měřicí soustava. Na řídící jednotce se nastavují parametry jako nabíjecí napětí, počet impulzů, doba nabíjení atd. Pokud je vše nastaveno, stiskem tlačítka ready se odpojí uzemnění nabíjecího zdroje. Stiskem tlačítka HV-On se začnou nabíjet vysokonapěťové kondenzátory zvoleným nabíjecím napětím. Při nabití na námi zvolenou hodnotu zazní siréna a dojde k přeskoku na jiskřištích a následné činnosti svodiče. Měřicí soustava pak zaznamená data, které se zobrazí na obrazovce počítače. Obdobně se postupovalo při měření na dalších svodičích. Jakmile se odměřily dvě bleskojistky pro venkovní a vnitřní použití s trvalým provozním napětím 16 kV, přišlo na řadu přepojení impulzního generátoru na konfiguraci 3s2p. Stiskem nouzového tlačítka se automaticky uzemní kondenzátory a vypne impulzní generátor. Při vstupu byla pro jistotu zemní tyč připojena k nabíjecímu zdroji. Poté se teprve mohlo začít pracovat na přepojení konfigurace a výměně svodiče. Na každém svodiči z obrázku 15 byl proveden test na zbytkové napětí a následně srovnán s katalogovým údajem. Svodič MWK 27 byl testován pěti jednotlivými impulzy  $8/20 \mu\text{s}$  v krátké chvíli po sobě, aby se ukázalo, zda nezačne ztrácet svou funkčnost.



Obrázek 19: Pracoviště pro měření zbytkového napětí

### 3.5 Naměřené a vypočtené hodnoty

Teplota 22°C, Tlak 1015 hPa, Vlhkost 40%

Tabulka 5: Naměřené hodnoty u měření zbytkového napětí

typ svodiče	$U_0$ (kV)	konfigurace SSG-ZUS	$I_n$ (kA)	$U_{res}$ (kV)
MWD 16	135	2s3p	10,26	49,27
MWK 16	135	2s3p	10,18	49,69
MWD 22	214	3s2p	10,08	69,93
MWK 22	214	3s2p	10,29	64,6
MWD 27	225	3s2p	10,05	81,7
MWK 27	225	3s2p	9,916	82,27

Tabulka 6: Tabulka pěti impulzů na svodiči MWK27

impulz	$U_0$ (kV)	$I_n$ (kA)	$U_{res}$ (kV)
1	225	9,916	82,27
2	225	9,906	82,86
3	225	9,888	82,86
4	225	9,843	82,86
5	225	9,906	83,42

**MWD** – Svodič přepětí určený pro instalaci do vnitřních prostor

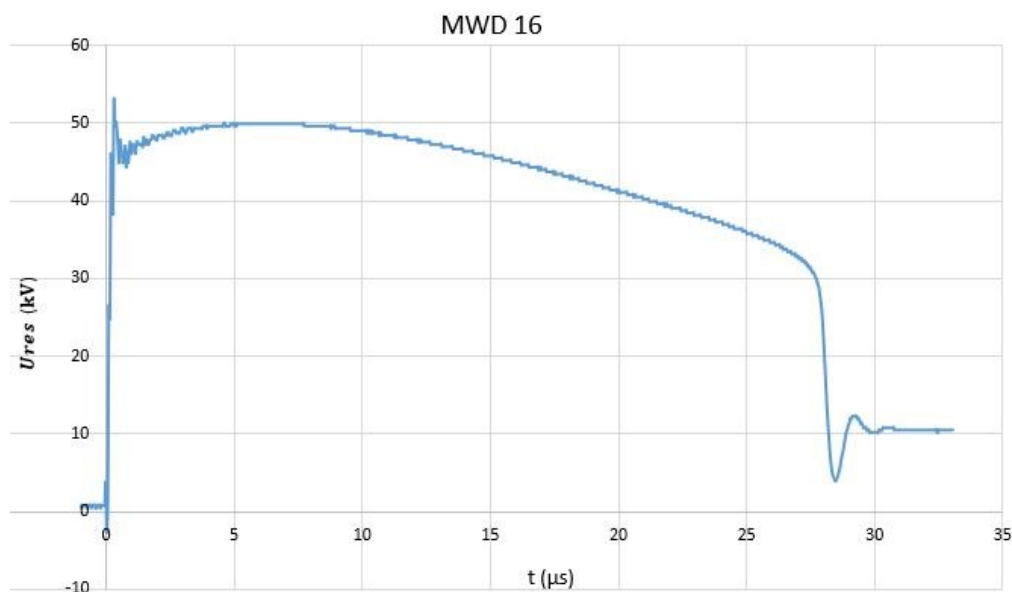
**MWK** – Svodič přepětí určený pro instalaci do venkovních prostor

$U_0$  (kV)- Nabíjecí napětí impulzního generátoru

$I_n$  (kA)- Jmenovitý výbojový proud svodiče

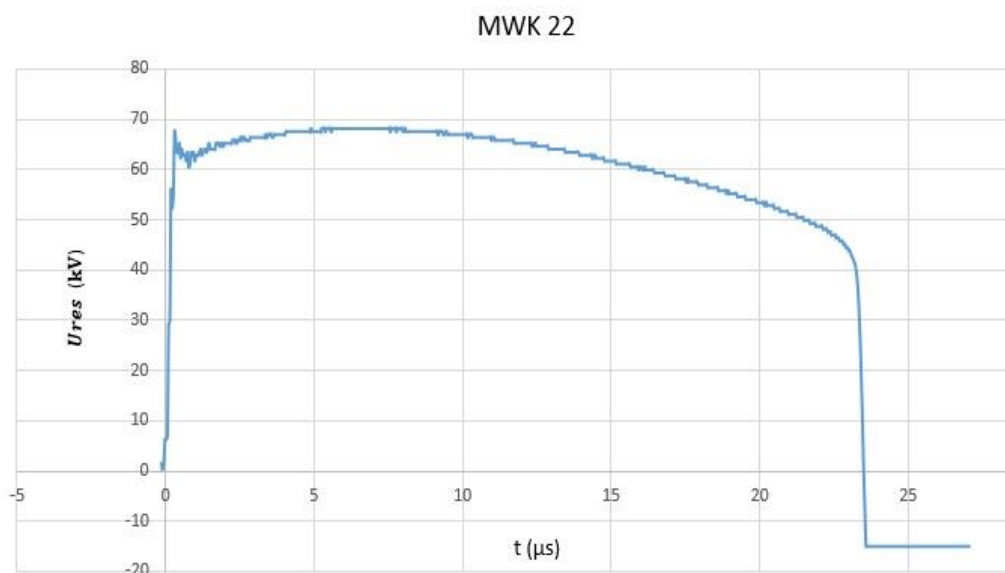
$U_{res}$  (kV)- Zbytkové napětí svodiče

### 3.6 Grafy z naměřených dat



Obrázek 20: Průběh zbytkového napětí na MWD 16

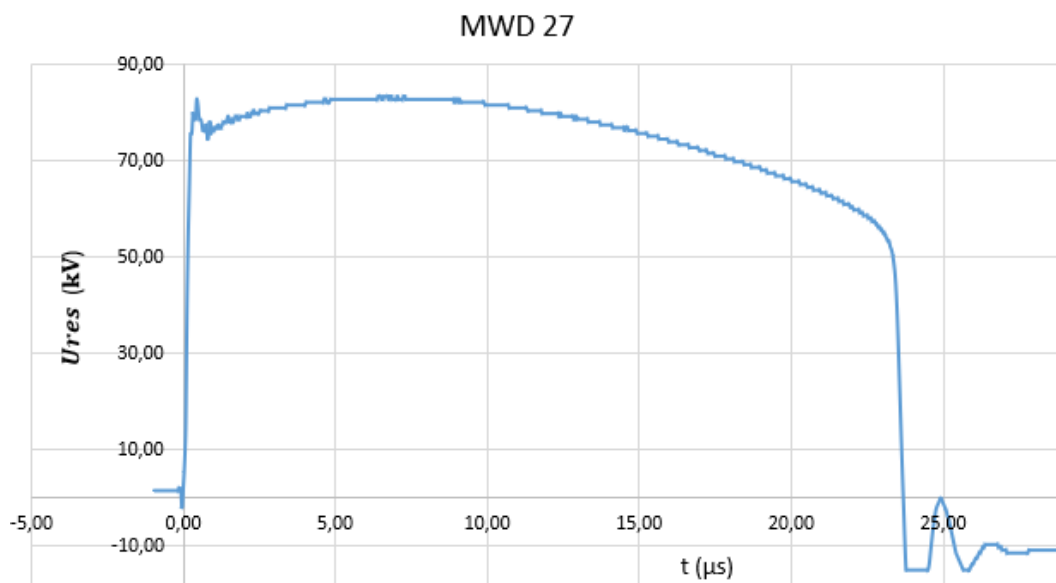
Z katalogu výrobce byla zjištěna hodnota zbytkového napětí 49,2 kV. Pomocí měřicí soustavy TR-AS 25-8 bylo změřeno reálné zbytkové napětí na daném svodiči. Jeho hodnota byla 49,27, což vyhovuje toleranci 10 %. Průběh zbytkového napětí tohoto svodiče je vidět na obrázku 20. Po začátku působení svodiče se objevují u všech průběhů mírné oscilace způsobené indukčností obvodu a poté hodnota zbytkového napětí naroste na zmiňovaných 49,27 kV. Pro svodič přepětí se stejným trvalým provozním napětím, který je určen pro venkovní použití, byla velikost zbytkového napětí 49,69 kV.



Obrázek 21: Průběh zbytkového napětí na MWK 22

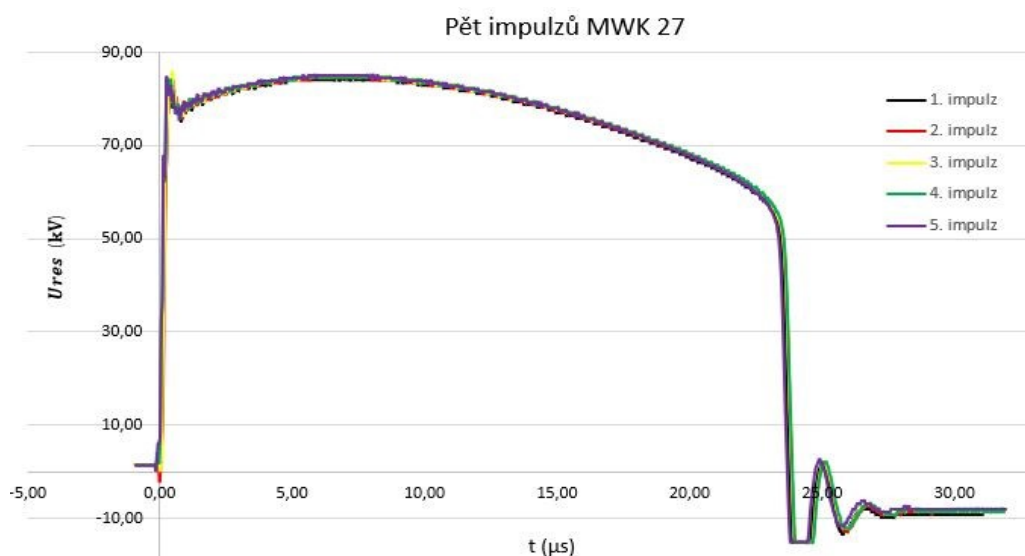
Výrobce uvádí u svodičů s trvalým provozním napětím 22 kV hodnotu zbytkového napětí 67,6 kV pro jmenovitý výbojový proud 10 kA. Naměřená hodnota měřicí soustavou u svodiče pro venkovní použití byla 64,6 kV, která vyhovuje toleranci. Průběh této hodnoty je zobrazen na obrázku 21. Svodič pro vnitřní instalaci měl hodnotu zbytkového napětí 69,93 kV.





Obrázek 22: Průběh zbytkového napětí na MWD 27

Pro svodiče s trvalým provozním napětím 27 kV je dána hodnota zbytkového napětí 82,9 kV. Tato hodnota platí pro jmenovitý výbojový proud 10 kA. Na obrázku 22 lze vidět průběh zbytkového napětí na svodiči pro vnitřní instalaci. Naměřené maximální hodnota byla 81,7 kV. Pro svodič k venkovnímu použití byla měřicí soustavou stanovena hodnota 82,27 kV.



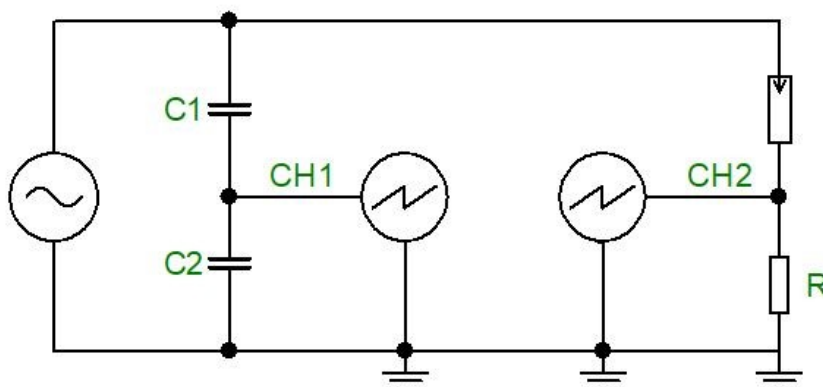
Obrázek 23: Průběhy pěti impulzů na MWK 27

Druhý test se týkal svodiče pro venkovní použití s trvalým provozním napětím 27 kV. Šlo o zjištění, zda svodič snese více pulzů za sebou, a tedy jestli bude zachována jeho funkčnost s ohledem na absorpci energie a s tím spojené tepelné namáhání. Jak lze spatřit na obrázku 23, toto zatížení testovaný svodič zvládl. Průběhy všech zbytkových napětí se téměř překrývají. Z teorie je známo, že svodič je s ohledem na absorbování přepětíových vln tepelně závislý. Pro odporové materiály platí, že s rostoucí teplotou se snižuje vodivost. Po měření byl tento svodič hmatem citelně teplejší než ostatní. Ovšem abychom dospěli k teplotní závislosti, musel by se svodič zatížit více než pěti impulzy.

## 4. Měření proudu svodiče přepětí

Úkolem tohoto měření bylo ověřit svodový proud bleskojistky. Svodový proud je vrcholová hodnota proudu protékající svodiče při přiloženém napětí. Pokud přiložíme trvalé provozní napětí svodiče  $U_C$ , bude jím téct jmenovitý svodový proud  $I_C$ . Jeho velikost se pohybuje ve stovkách mikro ampérů, ta se ale mění v závislosti na teplotě a stáří varistorových bloků. Test proběhl na svodiči ABB MWK16 s trvalým provozním napětím 16 kV, jenž je pokrytý silikonovým krytem a vybaven stříškami pro venkovní použití. Nacházel se v originálním obalu, tudíž nebyl před měřením používán a zdegenerován stářím.

### 4.1 Schéma zapojení a měřicí přístroje



Obrázek 24: Schéma zapojení pro měření svodového proudu

K měření byl využíván transformátor, ovládací pult, kapacitní dělič, dvoukanálový osciloskop, testovaný objekt, v mém případě svodič ABB MWK 16 a rezistor. Poměr kapacitního děliče je 1:2187. Napětí na prvním kanálu osciloskopu bylo měřeno sondou s poměrem 1:1000.

Transformátor 123 kV s kapacitním normálem 200kV

Ovládací pult

Kapacitní dělič, poměr 1:2187, typ MCF120/200, v.č. 874566

Osciloskop Owon PDS8102T,  $f = 100\text{MHz}$ , MAX 1GS/s, dvoukanálový

Svodič přepětí ABB MWK 16, v.č. 10850054,  $U_C = 16\text{kV}$ ,  $U_r = 20\text{kV}$

Rezistor,  $R = 497\Omega$

### 4.2 Popis a postup měření proudu

Měření probíhalo v učebně E122 pro výuku předmětu techniky vysokého napětí, která je vybavená zkušební kobkou. Tato kobka funguje jako Faradayova klec a slouží k bezpečnostnímu měření ve vysokonapěťových systémech. Je vybavena dveřmi, které jsou při měření zamčené, a tak se během měření do kobky nemůže nikdo dostat. Po uzamčení kobky je teprve možné zvyšovat napětí na transformátoru pomocí ovládacího pultu, který se nachází před kobkou. Na ovládacím pultu byl položený osciloskop, kterým bylo měřeno nastavované napětí na svodiči na prvním kanálu a napětí na rezistoru za bleskojistkou na druhém. Z napětí na rezistoru a známé hodnoty rezistoru se vypočetl výsledný svodový proud bleskojistky. Zbytek obvodu je zapojený ve zmiňované kobce. Bližší představu o pracovišti představují obrázky 15 a 16.



Obrázek 25: Vybavení kobky



Obrázek 26: Ovládací pult s osciloskopem

Po zapojení obvodu a zamčení kobky bylo na transformátoru nastavováno napětí na bleskojistce. Na obrazovce se začala objevovat přibližně sinusová vlna tohoto napětí. K reálně nastavené hodnotě jsme se dostali vynásobením konstantou 2,187, zobrazované hodnoty na osciloskopu. Tato konstanta vychází z poměru kapacitního děliče a poměru měřící sondy. Na kanálu dvě se objevovalo také napětí, které bylo měřeno na rezistoru. Měření bylo provedeno pro několik hodnot od 0 do 19,2 kV. Při překročení trvalého provozního napětí se na druhém kanálu začal dramaticky zvětšovat proud.

### 4.3 Naměřené hodnoty a vypočtené hodnoty

Teplota 21°C, Tlak 994 hPa, Vlhkost 50%

Tabulka 7: Naměřené a vypočtené hodnoty pro měření proudu bleskojistky

měření	$U_{C_{osc}}$ (kV)	$U_C$ (kV)	$U_{R_{osc}}$ (mV)	$C$ (pF)	$I_C$ (μA)
1.	0,707	1,55	16,9	69,8	34
2.	3,47	7,58	91,5	77,3	184
3.	4,38	9,58	124,3	83,1	250
4.*	6,79	14,85	203,8	87,9	410
5.	7,5	16,4	226,6	88,5	456
6.	8,34	18,25	254,9	89,5	513
7.	8,65	18,92	350,4	118,6	705
8.	8,78	19,2	481,6	160,6	969

pozn. Napětí a proud jsou efektivní hodnoty

$U_{C_{osc}}$  - nastavené napětí zobrazené na osciloskopu

$U_C$  – skutečné nastavené napětí

$U_{R_{osc}}$  - napětí na rezistoru zobrazené na osciloskopu

$C$  – předpokládaná hodnota kapacity bleskojistky

$I_C$  – proud tekoucí bleskojistkou

$p_d$  – poměr děliče 2187:1

$p_s$  – dělicí poměr sondy 1:1000

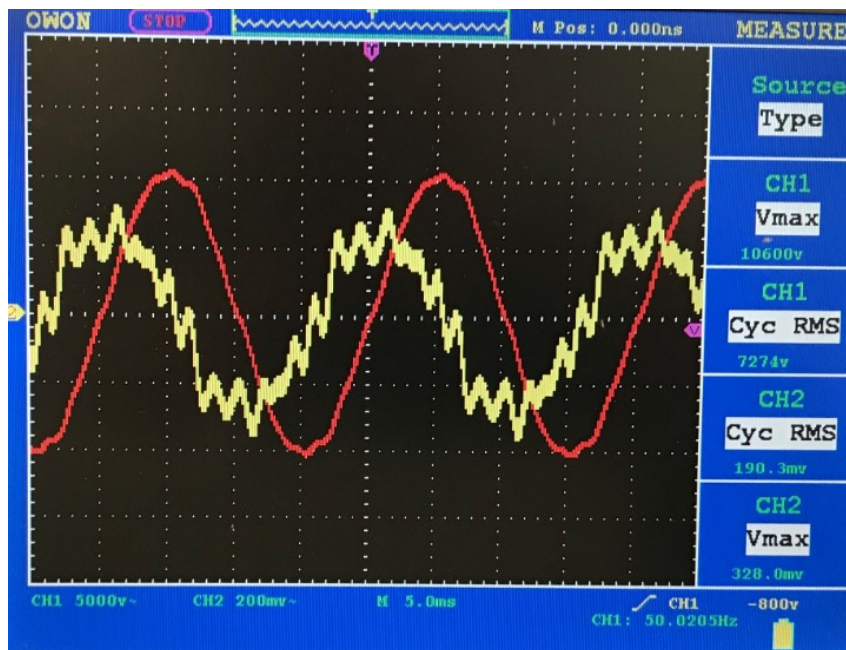
**Příklad výpočtu:**

$$U_C = U_{C_{osc}} * \frac{p_d}{p_s} = 6,79 * \frac{2187:1}{1:1000} = 6,79 * 2,187 = 14,85 \text{ kV} \quad (5)$$

$$I_C = \frac{U_{R_{osc}}}{R} = \frac{0,2038}{497} = 410 \text{ μA} \quad (6)$$

$$C = \frac{I_C}{\omega * U_C} = \frac{410 * 10^{-6}}{2 * \pi * 50 * 14850} = 87,9 \text{ pF} \quad (7)$$

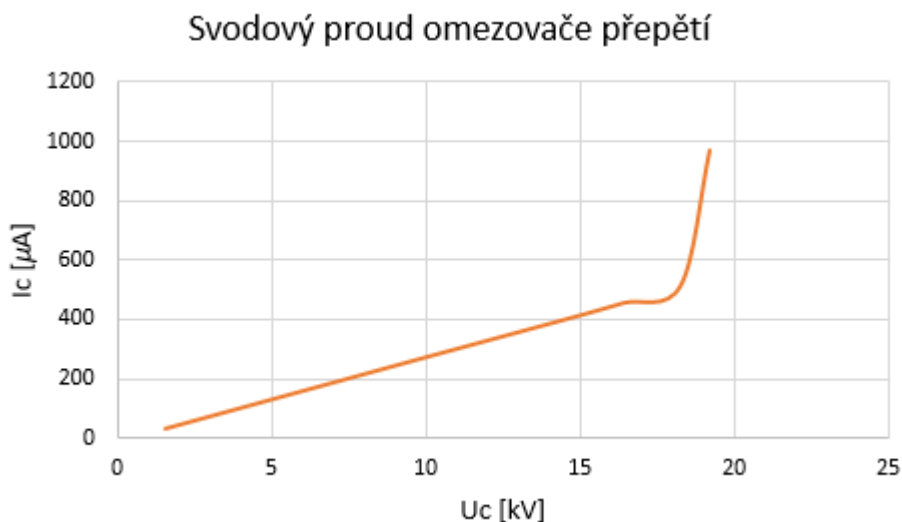
Podle zprávy z výstupního testu výrobce byla při přiloženém trvalém provozním napětí 16 kV vrcholová hodnota svodového proudu 540 μA. Na obrázku 17 je nastaveno napětí přibližně 16 kV. Na druhém kanále je maximální hodnota napětí 328 mV. Podle Ohmova zákona podílem této hodnoty velikostí odporu 496 Ω získáme vrcholovou hodnotu svodové proud  $I_C$ . Jeho hodnota je 661 μA. Rozdíl v těchto hodnotách je patrný. Tato odchylka může být dána oteplením varistorových bloků, jelikož byl svodič zatěžován během měření. Jak již bylo výše zmíněno, varistorové bloky jsou teplotně závislé. Další důvod odchylky může být fakt, že výrobce tento svodič zkoušel ve specializovanějších prostorech, za jiné teploty, tlaku, vlhkosti a s přesnějšími měřicími přístroji. Výrobce uvádí ve svém zkušebním protokolu toleranci  $I_C$  300 až 900 μA. Tudíž hodnota 661 μA je považována za dovolenou. Podle vzorce (7) bylo předpokládáno, že veškerý proud  $I_C$  je kapacitní. To ale přestává platit s tím, jak se se zvyšujícím napětím začnou otevírat varistory. Výpočet kapacity pro měření 7 a 8 v tabulce 7 byl ponechán právě jako indikátor otevírání varistorů.



Obrázek 27: Průběh napětí a proudu při  $U_c = 16 \text{ kV}$  (foto z osc.)

#### 4.4 Grafické závislosti naměřených hodnot

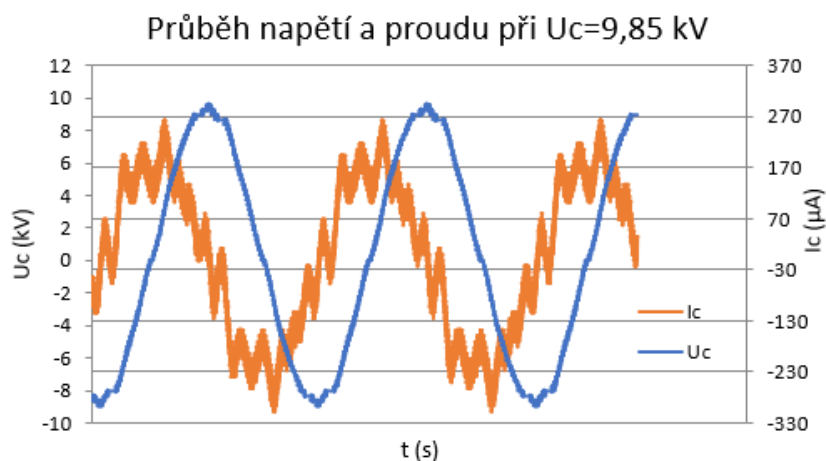
Z naměřených a vypočtených hodnot jsem nejprve sestavil voltampérovou charakteristiku bleskojistky (obr.18). Z té si můžete všimnout, že zcela kopíruje charakteristiku varistoru. Svodový proud s narůstajícím napětím pozvolna vzrůstá téměř lineárně. Při překročení trvalého provozního napětí svodiče proud začíná dramaticky stoupat.



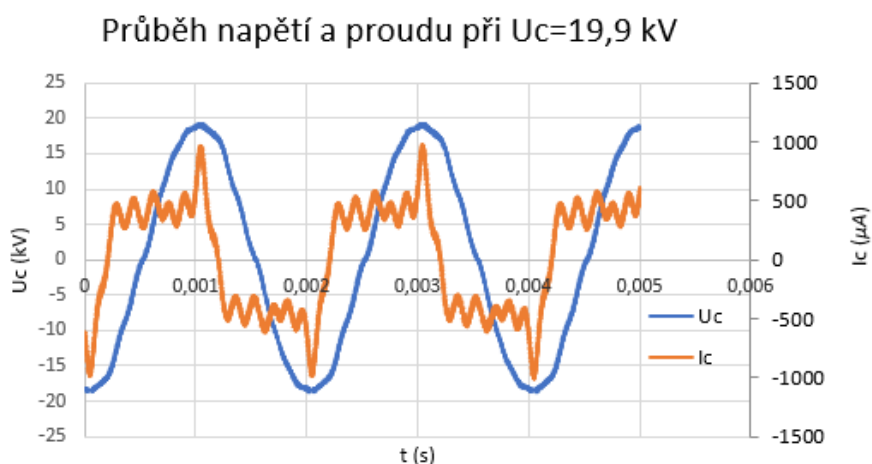
Obrázek 28: Svodový proud bleskojistky

Na obrázcích 19 a 20 jsou průběhy napětí a proudu, které jsem získal z osciloskopu pro různá přiložená napětí. Je patrné, že proud tekoucí bleskojistkou má kapacitní charakter. Proud předbíhá napětí o téměř 90 stupňů. Na obrázku 20, který je pro napětí větší než 16 kV vidíte ve špičkové hodnotě proudu zvětšování amplitudy. To potvrzuje předešlou úvahu z charakteristiky na obrázku 18, že při překročení dovoleného trvalého provozního napětí začíná varistorovým blokem uvnitř bleskojistky klesat odpor a růst proud. Proud na obrazovce se zobrazoval značně zašuměný vyššími harmonickými.





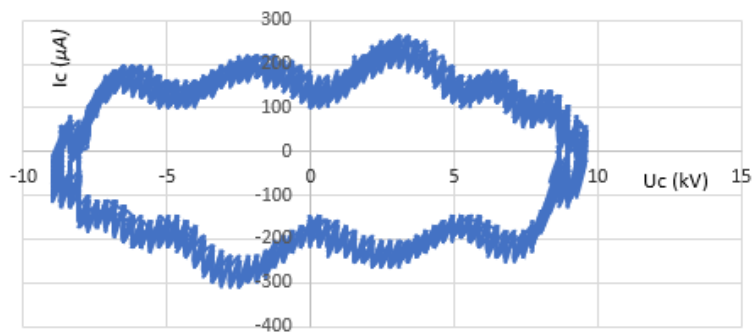
Obrázek 29: Průběh napětí a proudu při  $U_c = 9,85$  kV



Obrázek 30: Průběh napětí a proudu při  $U_c = 19,9$  kV

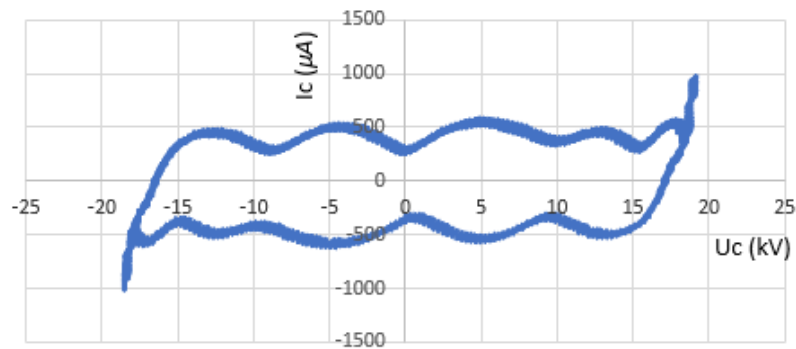
Z okamžitých hodnot napětí a proudu jsem sestavil Lissajousovy křivky. Tyto rovinné křivky vzniknou skládáním harmonických průběhů ve dvou navzájem kolmých přímkách. V mém případě se skládá ze závislosti okamžitých hodnot svodového proudu a přiloženého napětí. Tato data jsou získána přímo z osciloskopu pomocí USB uložště. Na obrázku 21 je křivka pro  $U_c = 9,58$  kV.

Lissajousova křivka okamžitých hodnot napětí a proudu pro  $U_c=9,58$  kV



Obrázek 31: Lissajousova křivka pro  $U_c = 9,58$  kV

Lissajouseva křivka okamžitých hodnot napětí a  
proudu pro  $U_c=19,2$  kV



Obrázek 32: Lissajouseva křivka pro  $U_c = 19,2$  kV

Posledním důkazem, že se chováníbleskojistky po překonání trvalého provozního napětí mění, je doloženo pomocí Lissajousevých křivek. Zatímco u menšího napětí má tato křivka vzdálený tvar elipsy a je souměrná podle osy  $y$ , u napětí většího než  $U_c$  na obrázku 22 je opět zachycena snahableskojistky zvyšovat svoji vodivost, což zapříčiní nárůst protékajícího proudu.

## Závěr:

Cílem této bakalářské práce bylo seznámit čtenáře se svodiči přepětí, jejich popisem, funkcí a historickým vývojem. Dále bylo demonstrováno měření na metaloxidových svodičích přepětí bez jiskřišť, které jsou pokryté silikonovou pryží.

V první kapitole jsem se věnoval samotnému přepětí. Bylo zde popsáno, co je to přepětí, jak vzniká a co ho může způsobit. Lze se zde také dočíst, jaké důsledky vlivem přepětí mohou nastat a jak jim můžeme předcházet, popř. omezovat tento nežádoucí přechodový stav.

Druhá kapitola se týká obecně svodičů přepětí. Jsou zde shrnuty všechny bleskojistky, které se využívají nebo využívaly ve vysokonapěťových systémech. Obsáhlá část této kapitoly se věnuje nejmodernějším svodičům přepětí s metaloxidovými rezistory bez jiskřišť. Konkrétně se zde dozvíte o jejich konstrukci, principu působení, typech, testování a jmenovitých parametrech. Zmíněný je zde i postup výroby varistorů, jejich voltampérová charakteristika a názorná ukázka varistorových bloků používaných pro svodiče přepětí firmy ABB.

Třetí kapitola se zabývá měřením zbytkového napětí. Tento údaj je jedním z jmenovitých parametrů svodičů přepětí. Měření probíhalo na šesti svodičích pro tři hladiny trvalého provozního napětí. V každé hladině byl k dispozici svodič pro venkovní a vnitřní použití. Měřením bylo zjištěno, že tyto bleskojistky se liší pouze tvarem krytu ze silikonové pryže. Aktivní část těchto svodičů je shodná. Při testu teplotní závislosti byl svodič testován pěti pulzy v krátké době za sebou. Podle průběhu změřených měřicí soustavou bylo zjištěno, že svodič odolal tomuto namáhání.

Poslední kapitola se věnuje měření trvalého provozního proudu svodiče. Trvalý provozní proud, často označovaný jako svodový, byl měřen osciloskopem na svodiči při několika úrovních přiloženého napětí. Ze zpracovaných grafů bylo patrné, že při překročení trvalého provozního napětí se začal dramaticky měnit trend proudu. Vodivost varistorových bloků se začala zvyšovat a s ní i proud tekoucího svodiče. Charakteristika tak připomínala voltampérovou charakteristiku varistoru z prvního kvadrantu.



## Literatura

1. MACH, Věslav. *Technika vysokého napětí*. 2. přeprac. vyd. Ostrava: VŠB – Technická univerzita Ostrava, 2006. ISBN 80-248-1161-8.
2. ČSN EN 60099-5 ed. 2 Svodiče přepětí – Část 5: Doporučení pro volbu a použití, 2nd ed. Praha: Český normalizační institut, 2014.
3. *Overvoltage protection*. Wettingen: ABB Switzerland, First published 1994. 88 s.
4. BURANT, Jiří. *Blesk a přepětí: systémová řešení ochran*. Praha: FCC Public, 2006. ISBN 80-86534-10-3.
5. KALOUSEK, Vlastimil, Jiřina SCHIEBLOVÁ a František STANĚK. *Technika vysokých napětí*. Brno: Vysoké učení technické, 1989. ISBN 80-214-0015-3.
6. ČSN EN 60071-1 ed. 2 Koordinace izolace: Část 1: Definice, principy, pravidla, 2nd ed. Praha: Český normalizační institut, 2006.
7. *Operating instructions SSG-ZUS Impulse Current Addition for SGS*. Klaus Schwenk, 2008. 45 s.
8. Gas-insulated surge arresters AZ [online]. Dostupné z: <https://new.abb.com/high-voltage/surge-arresters/high-voltage-arresters/protection-of-other-applications/gis-substation-applications-sf6-isolated-surge-arrester-az> [cit. 04.04. 2019].
9. Elektrická zařízení 2 [online]. Dostupné z: <https://docplayer.cz/7713191-4-2-8-pozadavky-na-kontaktne-materialy-39-4-2-9-ryzi-kovy-pouzivane-na-vyrobu-kontaktu-40-4-2-10-slitiny-a-spekane-kovy-pro-vyrobu.html> [cit. 07.04.2019]
10. Varistory [online]. Dostupné z: <http://ebook.diversant.sk/varistor.html> [cit. 07.04.2019]
11. Přepětí a svodiče přepětí [online]. Dostupné z: [https://www.outech-havirov.cz/skola/files/knihovna\\_eltech/esp/prepeti\\_svodice\\_prepeti.pdf](https://www.outech-havirov.cz/skola/files/knihovna_eltech/esp/prepeti_svodice_prepeti.pdf) [cit. 07.04.2019]
12. Surge arresters [online]. Dostupné z: [https://www.equipmenttimes.com/surge-arrester\\_266\\_2.htm](https://www.equipmenttimes.com/surge-arrester_266_2.htm) [cit. 07.04.2019]